

SÉRIE A, n° 1699

N° D'ORDRE :

2565

THÈSES

PRÉSENTÉES

A LA FACULTÉ DES SCIENCES
DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

POUR OBTENIR

LE GRADE DE DOCTEUR ÈS SCIENCES PHYSIQUES

PAR

R. PLANIOL

1^{re} THÈSE. — EXCITATION DE JETS ATOMIQUES PAR BOMBARDEMENT
ÉLECTRONIQUE.

2^e THÈSE. — PROPOSITIONS DONNÉES PAR LA FACULTÉ.

Soutenues le 1937 devant la Commission d'examen.

Jeudi, 3 JUIN 1937
MM. ABRAHAM..... *Table des C. Phys*
Président.

BRUHAT.....
E. DARMOIS..... } Examineurs.

- 3 JUIN 1937

PARIS

MASSON ET C^{ie}, ÉDITEURS

LIBRAIRES DE L'ACADÉMIE DE MÉDECINE

120, BOULEVARD SAINT-GERMAIN

1937

SÉRIE A, n° 1699

N° D'ORDRE :

2565

THÈSES

PRÉSENTÉES

A LA FACULTÉ DES SCIENCES
DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

POUR OBTENIR

LE GRADE DE DOCTEUR ÈS SCIENCES PHYSIQUES

PAR

R. PLANIOL

1^{re} THÈSE. — EXCITATION DE JETS ATOMIQUES PAR BOMBARDEMENT
ÉLECTRONIQUE.

2^e THÈSE. — PROPOSITIONS DONNÉES PAR LA FACULTÉ.

Soutenues le **1937** devant la Commission d'examen.

-3 JUIN 1937

MM. ABRAHAM..... *Président.*

BRUHAT..... } *Examineurs.*
E. DARMOIS..... }

PARIS

MASSON ET C^{ie}, ÉDITEURS

LIBRAIRES DE L'ACADÉMIE DE MÉDECINE

120, BOULEVARD SAINT-GERMAIN

—
1937

FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

MM.

Doyen honoraire..... M. MOLLIARD.
Doyen..... C. MAURAIN, *Professeur*, Physique du Globe.

Professeurs honoraires	{	H. LEBESGUE.	GUILLET.	LESPIEAU.
		A. FERNBACH.	PÉCHARD.	MARCHIS.
		A. LEDUC.	FREUNDLER.	VESSIOT.
		Émile PICARD.	AUGER.	PORTIER.
		Rémy PERRIER.	BLAISE.	
		Léon BRILLOUIN.	DANGEARD.	

PROFESSEURS

G. BERTRAND.....	T Chimie biologique.	L. JOLEAUD.....	Paléontologie.
M. CAULLERY.....	T Zoologie (Évolution des êtres organisés).	ROBERT-LÉVY.....	T Physiologie comparée.
G. URBAIN.....	T Chimie générale.	F. PICARD.....	Zoologie (Évolution des êtres organisés).
Émile BOREL.....	T Calcul des probabilités et Physique mathématique.	Henri VILLAT.....	T Mécanique des fluides et applications.
Jean PERRIN.....	T Chimie physique.	Ch. JACOB.....	T Géologie.
H. ABRAHAM.....	T Physique.	P. PASCAL.....	T Chimie minérale.
E. CARTAN.....	T Géométrie supérieure.	M. FRÉCHET.....	T Calcul différentiel et Calcul intégral.
A. COTTON.....	T Recherches physiques.	E. ESCLANGON....	T Astronomie.
J. DRACH.....	T Analyse supérieure et Algèbre supérieure.	M ^{me} RAMART-LUCAS	T Chimie organique.
Charles FABRY....	T Enseignement de Physique.	H. BÉGHIN.....	T Mécanique physique et expérimentale.
Charles PÉREZ....	T Zoologie.	FOCH.....	Mécanique expérimentale des fluides.
Léon BERTRAND..	T Géologie structurale et géologie appliquée.	PAUTHENIER.....	Physique (P. C. B.).
E. RABAUD.....	T Biologie expérimentale.	De BROGLIE.....	T Théories physiques.
M. GUICHARD.....	Chimie minérale.	CHRÉTIEN.....	Optique appliquée.
Paul MONTEL.....	T Théorie des fonctions et Théorie des transformations.	P. JOB.....	Chimie générale.
P. WINTREBERT..	T Anatomie et histologie comparées.	LABROUSTE.....	Physique du Globe.
L. BLARINGHEM..	T Botanique.	PRENANT.....	Zoologie.
O. DUBOSQ.....	T Biologie maritime.	VILLEY.....	Mécanique physique et expérimentale.
G. JULIA.....	T Mécanique analytique et Mécanique céleste.	BOHN.....	Zoologie (P. C. B.).
C. MAUGUIN.....	T Minéralogie.	COMBES.....	T Physiologie végétale.
A. MICHEL-LÉVY.	T Pétrographie.	GARNIER.....	T Mathématiques générales.
H. BÉNARD.....	T Mécanique expérimentale des fluides.	PÈRES.....	Mécan. théor. des fluides.
A. DENJOY.....	T Application de l'analyse à la Géométrie.	HACKSPILL.....	Chimie (P. C. B.).
L. LUTAUD.....	T Géographie physique et géologie dynamique.	LAUGIER.....	T Physiologie générale.
Eugène BLOCH....	T Physique théorique et physique céleste.	TOUSSAINT.....	Technique Aéronautique.
G. BRUHAT.....	Physique.	M. CURIE.....	Physique (P. C. B.).
E. DARMOIS.....	Enseignement de Physique.	G. RIBAUD.....	T Hautes températures.
A. DEBIERNE.....	T Physique Générale et Radioactivité.	CHAZY.....	T Mécanique rationnelle.
A. DUFOUR.....	T Physique. (P. C. B.).	GAULT.....	Chimie (P. C. B.).
L. DUNOYER.....	Optique appliquée.	CROZE.....	Recherches physiques.
A. GUILLIERMOND.	T Botanique.	DUPONT.....	T Théories chimiques.
M. JAVILLIER.....	Chimie biologique.	LANQUINE.....	Géologie.
		VALIRON.....	Mathématiques générales.
		BARRABÉ.....	Géologie structurale et géologie appliquée.
		MILLOT.....	Zoologie (P. C. B.).
		F. PERRIN.....	Théories physiques.
		VAVON.....	Chimie organique.
		G. DARMOIS.....	Calcul des Probabilités et Physique-Mathématique.

Secrétaire..... A. PACAUD.
Secrétaire honoraire..... D. TOMBECK.



A MONSIEUR HENRI ABRAHAM

Très respectueux hommages.



EXCITATION DE JETS ATOMIQUES PAR BOMBARDEMENT ÉLECTRONIQUE

Par R. PLANIOL

INTRODUCTION

J'ai cherché au cours de ce travail à mettre au point une source d'ions positifs fournissant des courants intenses dans un vide aussi élevé que possible.

Le nombre d'applications d'une semblable source semble *a priori* d'autant plus important que le courant qu'elle fournit est plus grand et que le vide régnant dans le tube est meilleur.

Depuis quelques années, on a imaginé de divers côtés plusieurs procédés nouveaux de production des ions sans toutefois, semble-t-il, attacher assez d'importance au deuxième point. Une des meilleures méthodes paraît être celle de l'arc à bas voltage. On sait qu'elle consiste à faire passer une décharge intense dans un tube généralement de petit diamètre. Il règne dans cette partie de l'appareil une très haute pression sans laquelle on ne pourrait obtenir de courants d'ions intenses, même en présence de la cathode chaude généralement utilisée pour fournir des électrons.

La partie rétrécie dans laquelle passe la décharge est percée latéralement d'un petit orifice par lequel débouchent les ions attirés par un champ électrique. Avec des intensités de l'ordre de l'ampère dans l'arc on obtient jusqu'à environ 1 milliampère de courant utile. Malheureusement il sort un

flux considérable de molécules ou d'atomes neutres qu'il faut ensuite éliminer tant bien que mal par des procédés de pompage plus ou moins compliqués.

Une autre méthode paraît *a priori* plus séduisante : l'émission anodique des sels chauffés. Ce dispositif autrefois utilisé en particulier par M. Morand ne semble pas s'être beaucoup généralisé. Il donne lieu également à d'abondants dégagements gazeux par le sel et fournit des courants d'ions intenses mais peu stables.

Pour commencer à étudier cette question, je suis naturellement parti du moyen le plus simple et du corps le mieux étudié et le plus commode.

Les tout premiers essais ont été faits sur du mercure avec des tubes à décharge de modèles courants mais il m'est apparu rapidement qu'il fallait utiliser des pressions très hautes pour obtenir des courants intenses.

Des résultats sensiblement plus encourageants ont ensuite été obtenus en plaçant dans le tube un fil chaud émetteur d'électrons. Ce dispositif rappelait un peu les arcs à basse pression.

J'ai ensuite eu l'idée d'utiliser la discontinuité de densité de matière existant entre l'intérieur et l'extérieur d'un jet atomique : on peut obtenir dans un jet intense une densité de vapeur très importante tandis qu'il demeure possible de maintenir autour du jet une pression extrêmement basse.

En faisant traverser le jet, à angle droit par exemple, par un faisceau d'électrons, on obtient une forte source d'ions positifs. On peut extraire ceux-ci par un champ électrique convenable et procéder à leur analyse.

J'ai utilisé cette dernière méthode pendant la presque totalité de mon travail mais avant d'y arriver, je décrirai maintenant les premiers essais qui ont conduit à sa réalisation.

CHAPITRE PREMIER

Essais préliminaires.

1. Premiers essais avec des tubes à gaz. — J'ai commencé mon travail avec du mercure en raison des facilités techniques qu'il procure et des nombreux travaux déjà effectués.

Le premier tube contenait une goutte de mercure et deux petites électrodes de fer. Un robinet permettait de le fermer après y avoir fait le vide.

En immergeant le tube dans un bain d'huile dont on pouvait faire varier la température, il était possible de modifier les caractéristiques de la décharge.

Ce tube avait ses électrodes très rapprochées ce qui obligeait à utiliser une pression élevée. Les électrodes ont ensuite été montées dans un corps en pyrex beaucoup plus grand, le diamètre étant porté de 20 à 40 mm. et la distance entre électrodes de 10 à 120 mm. Placé de nouveau dans une cuve d'huile, il s'allumait beaucoup plus aisément, mais nécessitait encore des pressions très élevées.

2. Premiers essais avec cathode chaude. — J'ai alors scellé latéralement un fil de tungstène monté sur un pied de lampe et ai recommencé les essais.

Le fil étant pris comme origine des potentiels, l'électrode pointue négative recevait les ions positifs et l'électrode creuse positive les électrons émis par le fil et dont le passage dans le mercure créait les ions positifs.

Le côté où allaient les électrons est resté relativement propre et celui vers lequel affluaient les ions positifs s'est tout

à fait métallisé, beaucoup de ceux-ci bombardant la paroi de verre. Il y avait déjà là une tentative de séparation des trajets des électrons et des ions.

Après quelques réglages préliminaires, j'ai pu obtenir des courants d'ions positifs sensiblement proportionnels à la tension de vapeur du mercure existant dans le tube. Le tableau suivant en donne un exemple.

Température du bain d'huile	Courant d'ions positifs à la cathode (en milliampères)
22	0,36
24	0,38
25	0,40
26,5	0,42
27,5	0,44
28,5	0,50

Il y avait 4 000 volts sur l'anode, 600 volts sur la cathode.

Le courant d'électrons émis par le fil et soigneusement maintenu constant pendant la durée de l'expérience était de 8 milliampères.

Les courbes du courant d'ions et de la tension de vapeur du mercure sont indiquées sur la figure 1.

La proportionnalité des ordonnées indique que la pression était assez basse pour qu'il n'existe pas de mécanisme d'ionisation de la vapeur autre que le choc des électrons émis par le fil contre ses atomes.

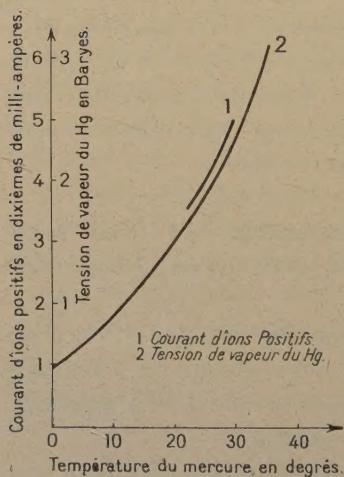


Fig. 1.

3. Première utilisation d'un canon à électrons — Ce mode de production des ions bien que fournissant déjà des courants importants à des pressions basses est loin d'être satisfaisant : la vitesse de l'électron au moment du choc ionisant est inconnue.

J'ai pensé qu'il était indispensable d'accélérer d'abord les électrons dans un espace aussi réduit que possible entre un fil et une grille très rapprochés et de leur faire ensuite parcourir un trajet relativement long à vitesse constante entre la grille et une plaque portée au même potentiel que la grille. Dans cet intervalle un champ électrique perpendiculaire au trajet des électrons sert à collecter les ions créés. Les quelques ions qui prennent naissance entre le fil et la grille par choc entre un atome et un électron encore incomplètement lancé ne sont pas recueillis par les électrodes collectrices : le champ intense régnant entre le fil et la grille les dirige vers le filament. Les ions recueillis sont donc créés par choc contre des électrons de vitesse connue. Ceci suppose bien entendu que la pression dans l'enceinte soit maintenue à une valeur basse : il faut en effet que le libre parcours non seulement des électrons mais encore des ions positifs parmi les atomes soit plus grand que les dimensions du tube. Sans cela, on pourrait avoir plusieurs chocs électroniques sur un seul atome ou des chocs entre ions positifs et atomes neutres et les conditions de production seraient de nouveau inconnues.

J'ai réalisé suivant ces idées directrices un tube en pyrex. Il se compose d'un corps central sphérique percé de 6 tubulures rodées. La pompe à diffusion d'un modèle à grand débit est soudée directement sur le corps du tube par l'intermédiaire d'une canalisation aussi courte que possible. Au-dessus d'elle un petit ballon en forme de champignon peut contenir un desséchant. Sur le corps principal sont fixés : vers le bas un tube à double paroi permettant de contrôler la tension de vapeur dans le tube par réglage de la température de l'eau de circulation, vers le haut un piège à

air liquide permettant d'éliminer en grande partie la vapeur de mercure si on le désire pour d'autres expériences. Les autres cols rodés servent pour les électrodes.

Le débit de la pompe a été choisi important de manière à éliminer le plus rapidement possible les dégagements parasites dus au fonctionnement.

Quelques essais préliminaires furent d'abord faits avec le fil à l'intérieur du corps principal sphérique du tube pour raccorder les résultats avec ceux fournis par l'appareil précédent. Ils furent en tous points analogues et indiquèrent bien la même relation entre le nombre d'ions produits pour une intensité électronique constante et la tension de vapeur dans le tube.

J'ai ensuite placé une grille tout près du filament. Pour les premiers essais elle était simplement constituée d'une feuille de cuivre rouge percée de trous de 5 mm. de diamètre environ. La puissance maxima que l'on pouvait dissiper était donc très limitée. En faisant passer dans le tube environ 50 milliampères d'électrons accélérés par une source de 350 volts placée entre le fil et la grille, j'ai pu obtenir environ 1 milliampère d'ions de mercure sur l'électrode collectrice. La température était de 22° ce qui correspond à une tension de vapeur du mercure de l'ordre de 1,5 à 2 baryes. Cette pression augmente beaucoup la charge positive autour du filament. Il est ainsi possible d'abaisser la tension accélératrice existant entre le fil et la grille jusqu'à des valeurs très basses : par exemple sous 20 volts l'émission électronique totale atteignait facilement 80 milliampères. Le rendement en ions (rapport du courant d'ions au courant d'électrons) restait du même ordre de grandeur qu'avec des électrons un peu plus rapides.

Cependant la pression demeurait nécessairement très haute dans le tube et il était impossible de la diminuer sans réduire proportionnellement le courant d'ions.

Il m'a semblé préférable de remplacer la vapeur présente

partout dans le tube par un jet atomique passant à travers le faisceau électronique.

Il devenait ainsi possible de séparer les deux quantités : densité de matière présente dans le faisceau et servant à la production des ions, pression dans le tube. Cette séparation permet d'utiliser des pressions extrêmement basses dans tout le tube. Par contre, le nombre d'atomes dans un jet, même très intense, demeure faible. Il y a donc lieu d'utiliser des faisceaux d'électrons très intenses, ce qui ne peut être obtenu qu'avec des puissances élevées. Cette obligation fait surgir un assez grand nombre de difficultés techniques : il faut renoncer complètement aux enceintes de verre antérieurement utilisées et peu pratiques pour des appareils importants. La réalisation et le maintien de pressions très basses dans des enceintes métalliques malgré la grande puissance dissipée est également assez délicate.

J'ai alors entrepris de longues recherches sur la production de jets atomiques intenses tout en continuant à étudier les faisceaux électroniques de vitesse connue.

Il a fallu aussi développer beaucoup le côté technique du vide. Ces groupes de recherches différentes ont été conduits simultanément, mais il semble préférable pour la clarté de l'exposé de les décrire successivement, ce qui nous amènera à l'installation actuellement en service.

CHAPITRE II

Le vide.

1. Pompes à diffusion à vapeur de mercure. — Les premiers essais faits dans une atmosphère de mercure ne nécessitaient évidemment que des dispositifs de pompage très rudimentaires. Ceci était d'autant plus vrai que les puissances mises en jeu dans les premiers appareils étaient très faibles : de l'ordre de quelques watts ou quelques dizaines de watts. Les dégagements gazeux parasites des électrodes et des parois de l'enceinte demeuraient petits et n'altéraient que très peu la pureté de l'atmosphère de vapeur de mercure à haute pression (de l'ordre de quelques barres).

Les pompes étaient alors : une pompe préliminaire à palettes à deux étages. Un petit piège de pyrex empêchait les introductions accidentelles de mercure à l'intérieur. Cette précaution est importante, ces pompes comportant souvent des parties en alliage au plomb qui sont très rapidement détruites par le mercure.

Il y avait ensuite une pompe à vapeur de mercure. Dans les premiers essais, elle était simplement de modèle commercial courant.

Elle fut très rapidement remplacée par une pompe en pyrex directement soudée sur le tube. Le débit était déjà beaucoup plus important mais il fallait un bon vide préliminaire pour obtenir l'amorçage (au moins 1/100 de millimètre) car le diamètre du corps de la pompe à l'endroit où le jet de vapeur débouche de la buse avait été porté de 1 à 4 cm. environ.

Cette pompe a fonctionné pendant longtemps sans donner aucun ennui.

Quand j'ai voulu commencer l'étude des jets atomiques de mercure, je me suis rendu compte très rapidement qu'il fallait abaisser beaucoup la pression et qu'il était indispensable d'ajouter à la pompe un piège à air liquide. Celui-ci fut placé entre la pompe et le tube mais sans canalisation interposée pour éviter autant que possible de réduire le débit.

Ce dispositif avait amené un gain considérable et a permis d'augmenter beaucoup l'intensité des faisceaux d'électrons. Mais le courant d'ions parasites dus aux gaz restants était encore relativement important et rendait difficile l'observation du courant d'ions utiles provenant du jet. Il fallait de nouvelles améliorations.

2. Pompes à vapeur d'huile. — Le pas décisif permettant la première mise en évidence des ions utiles fut franchi par l'utilisation des pompes à vapeur d'huile. On sait que ces appareils fonctionnent à peu près comme les pompes à mercure mais utilisent des huiles minérales. Leur tension de vapeur, très faible à température ambiante, est d'environ $1/10$ de millimètre à 200° - 220° .

Ces pompes sont extrêmement puissantes mais d'un emploi délicat et exigent un certain nombre de précautions :

Le vide préliminaire doit être excellent.

Elles ne s'amorcent pas au-dessus de $1/100$ de millimètre, mais une pression de l'ordre de la barye ou moins est bien préférable.

La pompe préliminaire à palettes, dont le débit pour des pressions aussi basses devient très faible, a donc été complétée par une pompe moléculaire de Holweck placée entre elle et la pompe à vapeur d'huile. L'ensemble ainsi constitué fonctionne parfaitement bien.

La principale difficulté d'utilisation des pompes à vapeur

d'huile est due à l'oxydation et au cracking de l'huile qui se produit à chaud en présence d'air : une remontée de la pression à 5/100 de millimètre d'air détruit l'huile très rapidement et une pression plus élevée peut amener des désordres graves. L'oxydation de l'huile donne des produits attaquant violemment les parties métalliques de l'appareil. Un démontage complet de l'installation est alors nécessaire pour la remise en état.

Il faut donc que les appareils soient parfaitement étanches et le demeurent en permanence. Cela ne va pas toujours sans quelques difficultés surtout pour des installations de recherches dans lesquelles les démontages sont fréquents. Ce petit point technique une fois résolu, les pompes à vapeur d'huile permettent d'obtenir des résultats qui semblent difficiles à atteindre par d'autres méthodes.

Le premier modèle mis en service avait un diamètre intérieur de 110 mm. et un débit d'environ 35 l./s.

Il m'a servi pour les recherches faites sur le mercure puis sur le cadmium avec le premier tube métallique.

Je l'ai ensuite remplacé par un modèle beaucoup plus puissant encore en service actuellement. Le diamètre intérieur a été porté de 110 à 220 mm. et le débit de 35 à 120 l./s. environ. Ces pompes sont chauffées électriquement. Le petit modèle consomme environ 450 watts et met 15 minutes pour démarrer. Le gros modèle consomme 1 kilowatt et démarre en 40 minutes. La pompe moléculaire de Holweck primitivement du type à commutatrice tournant à 4 500 t./m. a été ensuite remplacée par une pompe du gros modèle marchant directement sur le secteur et tournant à 3 000 t./m. dont la sécurité de marche est plus grande. Les deux ont donné toute satisfaction au cours d'un fonctionnement prolongé.

Bien entendu, si on veut utiliser au mieux ces appareils il y a lieu de supprimer toute canalisation et de placer l'enceinte à vider directement sur la pompe.

Malgré les qualités de ces pompes, il ne faut pas se faire

d'illusions sur le vide qu'elles permettent d'obtenir en fonctionnement. Avec des appareils démontables dont les assemblages sont obligatoirement faits à froid par des graisses ou ciments variés, il est impossible de purger les parois de l'enceinte. De plus, les pompes à vapeur d'huile laissent toujours diffuser au-dessus d'elles des traces de vapeur qui finissent par recouvrir toutes les parois d'un film mince. Quand l'installation est bien étanche, l'atmosphère résiduelle se compose presque complètement de vapeur d'huile. Lorsque l'appareil est en fonctionnement, le moindre changement soit dans la répartition des températures de parois, soit dans la marche des faisceaux électroniques, amène des dégagements extrêmement importants.

Des dispositifs automatiques protègent l'installation contre tout arrêt accidentel, soit des sources d'alimentation en énergie électrique, soit de l'eau de refroidissement de la pompe et des électrodes du tube. J'ai même ajouté récemment des dispositifs protecteurs qui coupent immédiatement la pompe et le tube en cas d'augmentation anormale de la pression (et en particulier en cas de rentrée d'air). Cet appareillage assez compliqué s'est révélé à l'usage d'un fonctionnement parfaitement sûr et a évité plusieurs fois des pertes de temps importantes.

3. Les manomètres. — Il est naturellement tout à fait impossible d'essayer de réaliser des pressions basses sans avoir un moyen permanent de contrôle de cette pression.

Il existe peu de manomètres qui puissent convenir ici : ils doivent, en effet, être sensibles, d'un emploi commode et à indications permanentes. La jauge de MacLeod est évidemment éliminée pour plusieurs raisons : manque de sensibilité, présence de mercure, indications non permanentes, atmosphère du tube constituée de gaz condensable (vapeur d'huile). Les jauges de Pirani que je n'ai pas essayées semblent également manquer de sensibilité. J'ai utilisé deux

types de manomètres : manomètre absolu de Knudsen et jauge à ionisation.

1° *Manomètre de Knudsen.* — Il est constitué par une feuille très légère pendue entre deux parois à températures différentes. On sait que le fonctionnement est dû aux forces radiométriques.

Soit p la pression à mesurer et T la température de l'enceinte. Désignons par T_1 et T_2 les températures des deux parois entre lesquelles est suspendue la feuille et par T_3 la température de celle-ci. La pression est naturellement supposée assez basse pour que le libre parcours soit très grand devant les dimensions de l'appareil. En supposant que pendant les chocs les échanges d'énergie entre les molécules et les parois se fassent de la même façon, la pression entre la feuille et la paroi n° 1 est reliée à la pression à mesurer par la relation :

$$p_1 = p \frac{\sqrt{T_1} + \sqrt{T_3}}{2\sqrt{T}}$$

de même entre la feuille et la paroi n° 2 règne une pression :

$$p_2 = p \frac{\sqrt{T_3} + \sqrt{T_2}}{2\sqrt{T}}.$$

La feuille est donc soumise à une force proportionnelle à la différence de ces pressions :

$$F = K.p. \frac{\sqrt{T_2} - \sqrt{T_1}}{2\sqrt{T}}$$

indépendante de la température de la feuille. Il suffit donc de mesurer T_1 , T_2 , T et F pour connaître p . Dans le calcul de la force appliquée à la feuille ne figure pas la nature du gaz, ce qui justifie le nom d'absolu donné à cet appareil par son auteur. On voit également que la forme des surfaces en regard n'intervient pas non plus. Il est ainsi possible d'employer des feuilles minces dont la surface est généralement

assez tourmentée. Dans l'appareil dont la figure 2 montre une réalisation la construction est entièrement métallique. Le champ électrique est ainsi annulé à l'intérieur, ce qui évite toute attraction électrostatique parasite sur la feuille. Les deux parois sont constituées par des blocs de cuivre rouge dans lesquels passe une circulation d'eau. La température des parois est indiquée par les deux thermomètres

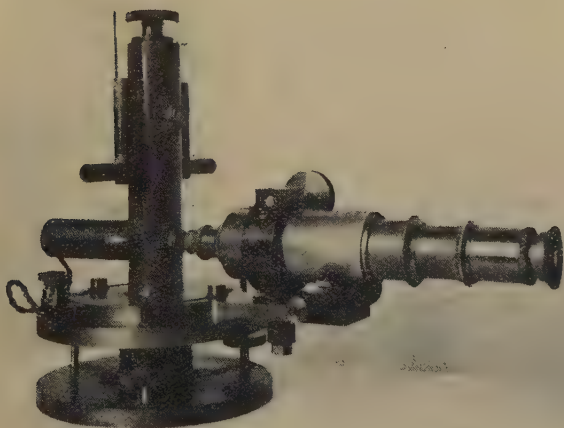


Fig. 2.

au $1/10$ de degré qui surmontent l'appareil; les blocs de cuivre sont supportés par de petits tubes de maillechort de $10/100$ de millimètre d'épaisseur assurant à la fois le passage de l'eau, l'étanchéité et l'isolement thermique.

La distance entre les parois est d'environ 5 mm. et leurs dimensions 20×100 mm. Entre elles est suspendue une feuille d'aluminium battu (dimensions 5×75) de $2/3$ de micron d'épaisseur. A l'extrémité inférieure est fixé un petit

morceau de fil de verre de $1/100$ de millimètre de diamètre. Un microscope à oculaire micrométrique pointant ce fil permet de repérer les positions de la feuille. La mise en place est assez délicate et demande quelques précautions. Il faut surtout s'assurer que la feuille ne présente pas de raideur due à une déformation, mais pend librement et est uniquement rappelée par son poids.

Connaissant l'épaisseur de la feuille, on peut calculer *a priori* la sensibilité de l'appareil et l'expérience, par comparaison avec une bonne jauge de Mac Leod, fournit une confirmation très satisfaisante dans le domaine de pression commun aux deux appareils.

Dans le manomètre utilisé ici, avec une différence de température de 10° entre les deux parois la déviation totale de 100 divisions était obtenue pour $1/2$ barye. Comme on peut porter la différence de température à 50° et apprécier une déviation de 2 à 3 divisions environ, on pouvait descendre jusqu'à quelques millièmes de barye.

Pour des pressions aussi basses, l'amortissement gazeux a complètement disparu et la feuille est perpétuellement agitée par les vibrations du sol, ce qui m'a amené provisoirement à renoncer à l'emploi de cet appareil. Il se peut que sur un sol parfaitement stable, la feuille demeure agitée aux très basses pressions par de brusques variations de pression. Il serait très intéressant d'éclaircir ce point.

Ce manomètre est tout à fait remarquable et fonctionne très bien. Il faut simplement faire attention à ne pas avoir de rentrées d'air trop brutales qui détruisent la feuille.

2° *Jauges à ionisation.* — Je me sers principalement de jauges à ionisation qui sont d'un type tout à fait banal. Elles utilisent le montage dit à collecteur externe.

Le fil est en tungstène pur de 3 ou $4/10$ de millimètre. Il consomme de 6 à 12 ampères sous quelques volts. La grille est une hélice en fil de nickel. Elle est alimentée en courant alternatif par un transformateur de 500 volts.

L'émission du fil est réglée, par réglage du courant de chauffage, à 20 milliampères.

En série avec la grille, se trouve un condensateur de 4 microfards shunté par 8 000 ohms.

Entre les extrémités de la résistance, il existe donc une différence de potentiel continue de 160 volts environ qui sert à alimenter la plaque à travers un microampèremètre à sensibilités multiples mesurant le courant d'ions positifs.

Tous ces organes de commande de la jauge sont groupés dans un petit coffret d'un emploi commode.

J'ai commencé par utiliser une jauge en verre démontable. Mais la présence à proximité du filament d'un joint scellé amène des dégagements qui rendent les indications incertaines pour des pressions un peu basses. Je l'ai remplacée par une jauge démontable également mais entièrement métallique et refroidie par une circulation d'eau; on évite ainsi l'inconvénient précédent. La pression continuant à baisser au cours des recherches, j'ai été gêné par des fuites électriques dans le pied de la jauge métallique et j'ai utilisé un appareil entièrement scellé. Mais ses électrodes n'étaient pas semblables géométriquement à celles des autres, ce qui amenait un changement d'étalonnage incommode pour les comparaisons rapides des résultats. La communication avec l'enceinte à vider n'était pas assez largement établie pour pouvoir assurer l'égalité de pression, surtout dans les bons vides. J'ai donc remplacé cet appareil par une autre jauge en verre étudiée spécialement pour remédier à ces défauts divers.

Cette jauge est montée en permanence sur le tube et sert pour les mesures aux pressions basses. La jauge métallique démontable est également en service et commande les dispositifs d'asservissement signalés plus haut.

Les mesures de pression faites avec les jauges ne semblent guère avoir qu'une valeur qualitative. En particulier, la nature du gaz influe énormément. Comme elle est générale-

ment inconnue, l'interprétation des résultats est assez incertaine. Il est toutefois probable que pour les pressions basses, comme je l'ai déjà signalé, l'atmosphère se compose principalement de vapeur d'huile. Il existe bien une table de correspondance fournie par le constructeur entre les lectures de la jauge et les valeurs de la pression pour quelques gaz usuels, mais les résultats demeurent assez peu sûrs. Il m'a semblé que les indications de la jauge comparées à celles du manomètre de Knudsen divergent d'une manière d'autant plus accentuée que la pression diminue, le manomètre indiquant des pressions plus hautes que la jauge. L'étude de ce point sera reprise ultérieurement. Il paraît raisonnable d'admettre pour la pression une valeur voisine de 10^{-3} barye.

CHAPITRE III

Les tubes.

Les tout premiers essais (tubes à décharge dans les gaz) étaient bien entendu en verre (pyrex) avec passages d'électrodes en tungstène scellés dans la paroi. Les électrodes étaient en fer.

L'utilisation d'un jet atomique nécessitait un tube beaucoup plus compliqué. Le jet étant vertical, le faisceau d'électrons qui le traverse est horizontal ainsi que le champ électrique collectant les ions.

Il est donc nécessaire de disposer dans l'enceinte de 3 groupes d'ouvertures perpendiculaires entre eux pour le jet les électrons et les ions. Il faut encore placer le plus grand des orifices : celui qui réunit le tube et la pompe.

Heureusement si le faisceau d'électrons et le jet traversent complètement la chambre d'expériences, il n'en est pas de même pour les ions positifs puisque ceux-ci prennent naissance dans l'appareil. Il suffit donc d'un seul orifice pour les extraire et la pompe peut être placée en face. Cette disposition se trouve déjà à peu près réalisée sur le tube qui a servi aux premiers essais de jet avec le mercure d'abord puis avec le cadmium. Les électrodes déjà assez importantes étaient fixées sur le tube de verre au moyen de rodages graissés ou scellés à la picéine. La pompe a été, comme je l'ai indiqué plus haut, remplacée par une pompe à diffusion à vapeur d'huile du type 35 l./s. Mais le tube était très mal adapté à la pompe : la section les mettant en communication était beaucoup trop faible et une grande partie des avantages était perdue.

J'ai alors réalisé un premier tube métallique permettant une bonne utilisation de la pompe. Ce tube gardait tout à fait la même disposition du principe que l'appareil de verre

et était interchangeable avec lui. On pouvait, en particulier, utiliser les mêmes électrodes et appareil à jet, ce qui était très important.

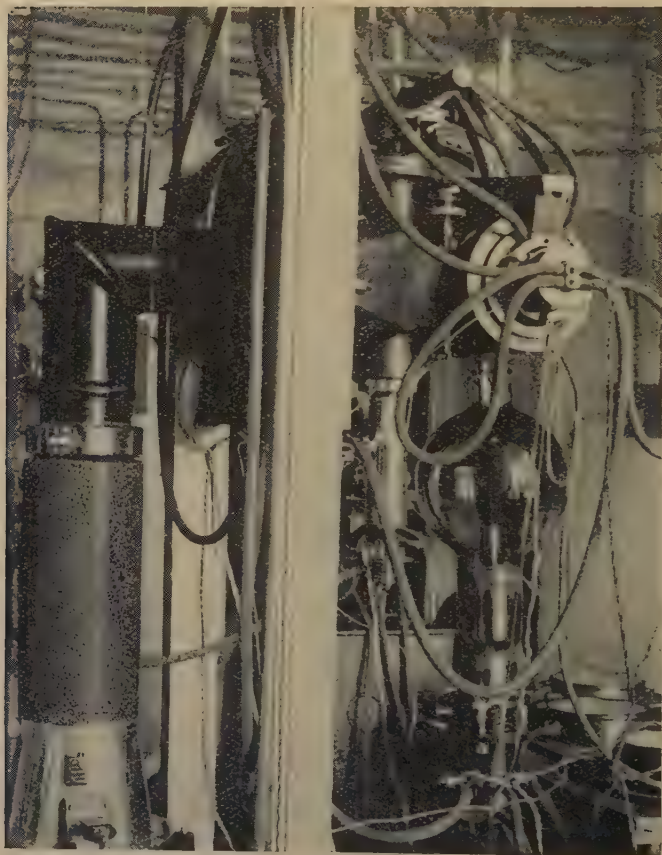


Fig. 3.

La figure 3 montre ce tube monté. On voit à gauche la pompe à vapeur d'huile, puis sur le tube se trouvent le

manomètre de Knudsen en haut et une jauge à ionisation au-dessous. La photo a été prise pendant une opération auxiliaire de dégazage du creuset à cadmium, provisoirement monté dans un grand ballon de pyrex.

La communication entre le tube et la pompe était devenue considérable : 11 cm. de diamètre au lieu de 4, ce qui permettait une pleine utilisation du débit. Le tube a été construit en bronze coulé. En prenant quelques précautions indispensables, cette matière m'a toujours donné d'excellents résultats relativement à l'étanchéité.

Avec ce mode de réalisation, on peut très facilement obtenir des pièces de formes compliquées si on le désire. Le tube était fixé sur son support par trois vis calantes permettant de régler sa position. La pompe était également posée sur des vis et raccordée à la pompe moléculaire et au tube par des soufflets plissés (4 cm. de diamètre côté pompe moléculaire et 15 du côté du tube). Cette disposition permet une mise en place rapide et soustrait les différents joints aux efforts mécaniques susceptibles de les briser.

Par la suite, l'appareil à jet étant devenu beaucoup plus important a nécessité la réalisation d'un second tube métallique encore en service actuellement. Il n'est, à quelques détails près, que l'agrandissement du précédent. Je n'en dirai donc que peu de mots. Le diamètre du raccord du côté de la pompe a été porté de 110 à 220 mm. Le diamètre de jonction avec l'appareil à jet est passé de 50 à 110 mm. et le diamètre disponible pour le logement du canon à électrons de 50 à 110. Le montage de l'ensemble est tout à fait identique à celui du précédent appareil. Des vis de réglage permettent une mise en place très aisée. Le poids du tube seul est passé de 12 à 50 kg. environ et le vide a été obtenu sans plus de difficultés que dans le premier malgré la grande augmentation de volume.

CHAPITRE IV

Le jet atomique.

J'ai essayé d'abord de produire des jets de mercure, car ce corps est certainement un de ceux qui les fournit le plus facilement.

On sait que les appareils de production des jets comportent presque toujours un four dans lequel on porte le corps à une température convenable et un ou plusieurs diaphragmes de collimation dont certains peuvent être à basse température pour condenser les atomes de vapeur qui les rencontrent. Le jet est obtenu après ces diaphragmes dont le rôle est d'éliminer toutes les molécules n'ayant pas une vitesse dirigée approximativement dans la direction voulue.

1. Premiers appareils d'essai. — J'ai utilisé d'abord des appareils en verre aussi bien pour le four que pour la collimation. Le four était chauffé par une circulation d'eau chaude et la partie froide refroidie à l'air liquide.

Les orifices de collimation étaient métalliques et la transmission de chaleur par simple contact dans le vide entre le verre et le métal se faisait difficilement.

Ces appareils fragiles et assez incommodes ont été rapidement remplacés par des appareils métalliques.

2. Appareils métalliques. — Les résultats obtenus ont été beaucoup plus satisfaisants.

Le four était encore chauffé par une circulation d'eau, mais j'avais pu lui ajouter une soupape commandée de l'extérieur permettant d'interrompre à volonté le jet atomique.

Les courants d'ions positifs fournis par cet appareil (de l'ordre de $1 \mu\text{A}$) n'ont pu être décelés que grâce à cette soupape. Elle permettait en effet de distinguer dans le courant

d'ions parasites (environ 25 μ A) la très petite partie qui revenait au jet lui-même.

La pièce froide se composait d'un récipient annulaire en cuivre massif communiquant avec l'atmosphère dans lequel on pouvait verser environ 1 litre d'air liquide. La partie centrale portait au sommet, dans le vide, le diaphragme froid. Des vis calantes permettaient le réglage. On voit que la définition du jet était ainsi très simplement obtenue par les deux diaphragmes : l'un chaud à la sortie de la chaudière et l'autre froid au sommet du piège.

Comme je le signalais un peu plus haut, ce montage a donné des résultats parfaitement nets, mais beaucoup trop faibles et il fallait d'une part augmenter l'intensité du jet et d'autre part abaisser beaucoup la pression dans le tube.

Pour réaliser ce dernier point, il devenait nécessaire d'augmenter la section de passage entre la pompe et la chambre d'expérience. C'est à ce moment que j'ai réalisé le premier tube métallique décrit plus haut.

Je cherchais à voir s'il était possible d'utiliser un jet atomique comme source d'ions positifs sans attacher d'importance à la nature des ions produits. En effet, si la méthode s'avérait capable de produire des ions, il était évident qu'elle pourrait en fournir de tous les corps susceptibles de former des jets atomiques ou moléculaires. Il n'y avait donc aucun inconvénient à changer la nature du corps.

Le mercure devenait dangereux pour des appareils métalliques construits presque exclusivement en cuivre ou en bronze. Par contre, le cadmium dont il est possible d'obtenir des jets avec une facilité extrême paraissait convenir très bien.

Gardant alors la partie froide de l'appareil qui donnait toute satisfaction, j'ai construit un premier four pour chauffer le cadmium. La température à atteindre est comprise entre 250 et 400° C. suivant l'intensité du jet. Le premier four se composait d'un creuset contenant le cadmium et d'un cou-

vercle entourant complètement le creuset servant de diaphragme chaud. Il est en effet très important que le diaphragme chaud soit plus chaud que le bain de cadmium. Sans cela, il se produit une obstruction rapide du trou. Cette disposition qui s'est révélée très efficace a toujours été conservée par la suite. A l'extérieur du couvercle se trouvait une feuille de mica recouverte par une hélice de fil de nichrome, elle-même recouverte d'une deuxième feuille de mica destinée à maintenir l'enroulement en place à chaud.

Ce four avait l'inconvénient de porter du mica à haute température; on avait ainsi des dégagements gazeux importants. En outre, les échanges thermiques se font très mal dans le vide comme je l'ai signalé pour le piège. Il faut recourir au rayonnement pour assurer le transport de la chaleur. Pour maintenir le cadmium aux environs de 300° , le mica se trouvait vers 6 à 700° et le nichrome au-dessus de 1000° . J'ai donc remplacé le mica par du quartz et le nichrome par du tungstène.

Un tube de quartz transparent portait à sa surface extérieure un sillon creusé à la meule. Ce sillon hélicoïdal était non pas simple mais double en sorte que l'entrée et la sortie de l'enroulement se trouvaient tous deux à l'extrémité inférieure du four. Le montage était ainsi grandement facilité. Ce four ne s'est pas non plus révélé très commode : le tungstène et le quartz étaient attaqués et l'isolement difficile à maintenir. Mais l'inconvénient le plus grave était une excessive consommation d'air liquide : le four étant entièrement logé dans la partie froide et fonctionnant principalement par rayonnement, chauffait bien le creuset mais chauffait aussi la partie froide. Il fallait éviter cela. J'ai alors utilisé une autre méthode tout à fait différente : un fil fin de tungstène est placé le plus près possible du couvercle du creuset et peut émettre des électrons qui vont bombarder celui-ci. La chaleur se trouve ainsi dégagée dans la pièce même où elle doit être utilisée et la question du transport de chaleur d'une

pièce à une autre a ainsi disparu. En outre, il n'y a aucune pièce isolante à température élevée et les dégagements gazeux sont très diminués. Enfin, la température la plus élevée existant dans l'appareil étant celle du creuset (environ 300° C.) le rayonnement est très faible et la consommation d'air liquide se trouve fortement réduite.

Le fil émetteur d'électrons est très petit et dégage une quantité de chaleur négligeable. Les fours ainsi construits marchent très bien et sont demeurés en service. Ils peuvent, si on le désire, consommer très peu d'énergie. Le premier modèle réalisé dont l'isolement thermique avait été particulièrement soigné ne consommait que 4 watts pour être maintenu à 320° environ.

Le diaphragme chaud est percé dans une pièce épaisse : il a 5 mm. de diamètre et 20 de longueur. Il est bien connu qu'avec cette disposition, l'émission de vapeurs demeure inchangée suivant l'axe du trou, mais est assez fortement diminuée dans les directions obliques.

Malgré cette précaution, la condensation de cadmium sur le diaphragme froid demeurerait très intense et, au bout de 3 à 4 minutes de marche, l'appareil était complètement obstrué, rendant le travail impossible. Il fallait évidemment remédier à cet inconvénient grave qui se présente chaque fois que l'on veut obtenir des jets intenses. J'avais envisagé plusieurs moyens pour y porter remède, mais une solution très élégante m'a été fournie par M. Bogros que je tiens à remercier ici. Si le deuxième diaphragme au lieu d'être à la température de l'air liquide se trouve, au contraire, porté à haute température, il est bien évident que les atomes de cadmium ne pourront se fixer sur lui et qu'en conséquence il ne se bouchera pas. Mais si les deux diaphragmes et l'intervalle qui les sépare sont à température élevée, il règne entre eux comme dans le four une haute pression et le jet ne se produit pas. Il faut donc les séparer par une enceinte froide dans laquelle se fait la condensation rendant possible l'existence du jet.

J'ai donc réalisé un nouvel appareil utilisant ce dispositif. On conçoit aisément que la concentration, en un espace aussi restreint de pièces à températures très différentes, n'aille pas sans quelque complication technique. Aussi l'ensemble est

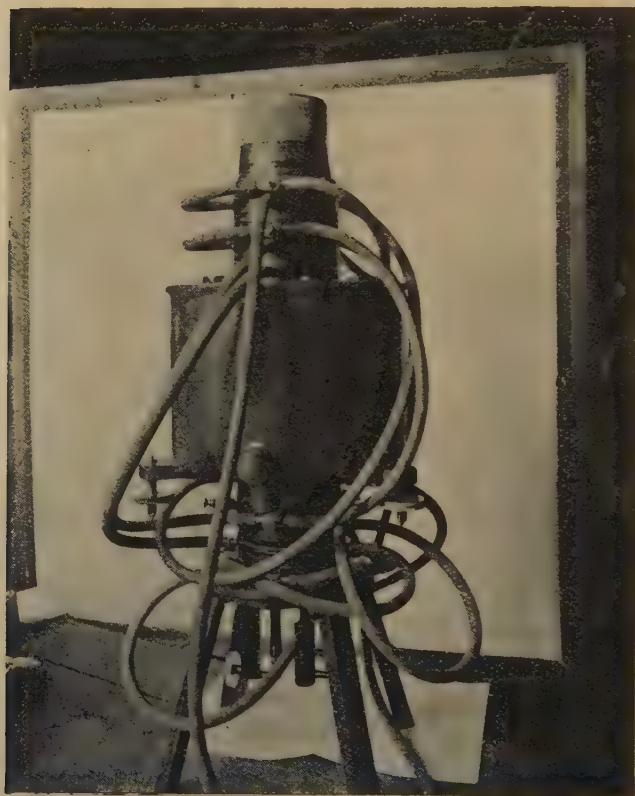


Fig. 4.

devenu beaucoup plus volumineux. En particulier, la présence de l'anneau chaud à la partie supérieure a nécessité une assez forte augmentation du diamètre, ce qui a entraîné le changement du tube et de la pompe. La figure 4 repré-

sente une vue extérieure de l'appareil complètement monté.

Dans l'ancien montage, l'angle du jet primitivement de 18° avait été porté à 30° environ.

Dans le nouveau, destiné à produire des jets très intenses, cet angle a été porté à 60° ce qui semble une limite difficile à dépasser.

Dès sa mise en route, ce nouvel appareil s'est révélé incomparablement plus puissant que le précédent. Il est susceptible de marcher plus d'une heure au régime maximum sans obstruction. On ne peut, en effet, comme il est bien connu, augmenter indéfiniment l'intensité du jet puisque la pression dans le four doit atteindre, au plus, une valeur telle que le libre parcours demeure comparable au diamètre de l'orifice de sortie. Pour une pression plus haute, il se produit devant le diaphragme chaud un brouillard qui rend le jet diffus.

La quantité de cadmium passant dans le jet est d'environ le $1/4$ de la quantité totale vaporisée par le four. Les $3/4$ restent dans la chambre froide. Dès les premiers essais, le débit horaire du jet a atteint 1 g. environ et a pu être progressivement porté jusqu'à 6 g. Ce chiffre doit être à peu près la limite maxima. Au delà, la collimation cesse d'être bonne et le jet n'est plus correctement défini.

L'appareil étant plus important que l'ancien, il a été possible de loger dans le four un petit volet manœuvrable en marche de l'extérieur et un dispositif de refroidissement rapide du creuset à la fin d'une expérience pour diminuer le dépôt de cadmium dans la chambre froide pendant le refroidissement du creuset.

Les températures des pièces chaudes et froides sont mesurées par des couples cuivre-constantan.

Une variation de température de 1° est aisément décelée. Cette précision semble également atteinte dans la reproduction de la température lors d'expériences successives. Elle est d'ailleurs nécessaire pour la comparaison des résultats, l'intensité du jet croissant extrêmement vite avec la température.

3. **Piège recueillant le jet.** — Le jet, après la traversée du faisceau électronique, est toujours recueilli sur une paroi refroidie par de l'air liquide. Primitivement celle-ci était très simplement constituée par le fond plat d'un piège en pyrex. Les petites dimensions permettaient ce mode de construction. Il n'en a pas été de même pour l'appareil suivant et j'ai d'abord recopié en métal le piège de verre, mais une nouvelle difficulté est apparue : tant que la quantité de cadmium transportée par le jet demeure faible (de l'ordre du décigramme environ) l'adhérence de la couche condensée est très suffisante. Avec des couches plus épaisses, il n'en est plus de même. La lame de cadmium distillé déposée sur le piège se trouve en effet refroidie d'un côté alors que de l'autre elle est exposée à l'intense rayonnement thermique du fil émetteur d'électrons qui n'en est éloigné que de quelques centimètres.

Il en résulte des dilatations qui la décollent. Les morceaux de cadmium se détachant du fond retombaient dans le faisceau d'électrons et étaient immédiatement volatilisés avec une vive émission de lumière.

Ce petit inconvénient a été très aisément surmonté en gardant la paroi latérale du piège et en remontant le fond de quelques centimètres. Le jet vient ainsi se condenser dans une sorte de cloche qui met le cadmium à l'abri de la chaleur du fil, et donne à la couche une adhérence suffisante.

CHAPITRE V

Le faisceau d'électrons.

1. Premiers essais rudimentaires. — J'ai indiqué au début que les premiers essais ont été faits avec des tubes remplis de vapeur de mercure contenant un fil de tungstène émettant des électrons. Ceux-ci prenaient progressivement leur vitesse dans la vapeur en allant du fil à une anode. Les collisions entre atomes et électrons avaient donc lieu à une vitesse inconnue.

Dès que j'ai eu l'idée d'utiliser des jets atomiques, il m'a semblé tout à fait utile d'accélérer complètement les électrons avant de leur faire traverser le jet, le parcours à travers celui-ci devant se faire à vitesse constante et connue. Il devenait donc nécessaire d'étudier la réalisation de canons à électrons.

2. Canon à électrons. — J'ai signalé que le premier essai a été fait en plaçant dans une des tubulures latérales du tube en verre un fil de tungstène derrière une simple feuille de cuivre percée de trous.

Ce système ne pouvait convenir que pour les très faibles puissances mises en jeu dans les premiers essais. La plaque perforée atteignait très rapidement une température dangereuse pour sa sécurité et pour celle du verre qui l'entourait.

J'ai ensuite réalisé une première grille accélératrice en cuivre massif. Une circulation d'eau entourait la grille. En même temps le fil de tungstène prenait la forme d'une spirale plate parallèle à la grille et placée à environ 5 mm.

derrière elle. Il était possible avec ce montage de dépenser environ 200 watts dans l'électrode refroidie, mais le rendement demeurait assez mauvais : une fraction peu importante des électrons passait à travers les trous de la grille et la plus grande partie rencontrait les barreaux. L'anode, au même potentiel que la grille, était placée en face de celle-ci et devait recueillir les électrons sortis de la grille après leur traversée du jet atomique.

Comme je l'ai déjà indiqué, un champ électrique normal aux deux directions précédentes (jet et faisceau d'électrons) sert à collecter les ions produits.

Les premiers essais faits avec ce montage avaient immédiatement montré que les électrons issus de la grille ne formaient pas du tout un faisceau homogène et parallèle. Ils se dispersaient dans tout l'intérieur du tube de verre, chauffant dangereusement la paroi surtout au voisinage de l'anode. Le champ transversal de collection des ions agissant comme dans un oscillographe cathodique venait encore compliquer la situation en déviant le faisceau et allant jusqu'à lui faire faire $1/4$ de tour.

3. Canon à électron avec champ magnétique. — Il était donc indispensable de mieux canaliser les électrons et de les rendre insensibles à l'action du champ transversal. Ce double résultat s'obtient heureusement avec une très grande simplicité : il suffit de placer autour du canon et de l'anode qui lui fait face deux bobines sans fer donnant un champ grossièrement uniforme dont les lignes sont dirigées dans la direction qui doit être suivie par les électrons. Un champ de quelques centaines de gauss est très suffisant pour diriger les électrons de faible vitesse utilisés ici et demeure sans action sensible sur les ions positifs tirés du jet qui sont beaucoup trop lourds. Avec ce champ, les électrons issus de la grille forment des faisceaux qui suivent presque exactement les lignes de force. On les rend facilement visibles en

laissant du gaz à une pression d'environ 1 barye dans le tube. Chaque trou de la grille, au moins ceux qui se trouvent devant une spire du filament, émet un faisceau qui est lumineux et on voit ainsi parfaitement le trajet des électrons. Ils arrivent alors tous sur l'anode sans aller frapper les parois du tube et reproduisent sur sa face plane les mailles de la grille et même les spires du filament. Le dessin se trouve être de même grandeur que la grille et le fil puisque la position de la grille et de l'anode est symétrique par rapport aux bobines. Dans l'intervalle qui sépare celles-ci, le champ étant plus faible, les lignes de force divergent légèrement et convergent de nouveau sur l'anode. Les faisceaux d'électrons suivent exactement le trajet des lignes de force et ceux qui sont au voisinage de l'axe demeurent sensiblement rectilignes.

En même temps, la présence du champ magnétique rend le faisceau tout à fait insensible au champ électrique de collection des ions qui, lui, est normal ; l'établissement de ce champ a seulement pour effet de donner aux faisceaux d'électrons une très faible déviation perpendiculaire au champ électrique comme il est bien connu pour les rayons magnéto-cathodiques. Il est aussi possible d'extraire les ions du jet sans altérer le fonctionnement du canon.

Les premières bobines utilisées avaient environ 1 600 tours de fil enroulés sur une carcasse de cuivre rouge refroidie par une circulation d'eau. Les deux bobines connectées en série consommaient 4,5 ampères sous 120 volts. Le champ dans la chambre d'expérience était de 5 à 600 gauss.

Lors du changement de l'installation de nouvelles bobines analogues ont été fabriquées. Avec une consommation de 10 ampères sous 120 volts, le champ est de 8 à 900 gauss.

4. Les grilles accélératrices. — La figure 5 montre les grilles successivement utilisées. La plus ancienne avait de petits trous et pouvait absorber, comme je l'ai déjà signalé,

environ 200 watts. Une légère surcharge a amené la fusion de quelques barreaux à proximité du centre. Une grande amélioration a été obtenue par l'augmentation du diamètre des trous porté de 4 à 6 mm. 5. Un meilleur refroidissement permettait de porter à 300 watts en toute sécurité la puis-

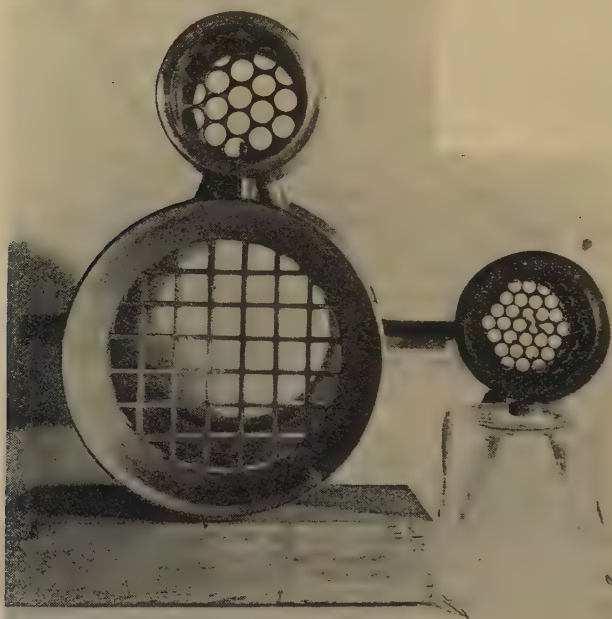


Fig. 5.

sance dépensée sur les barreaux. Le rendement atteignait 50 o/o : pour 600 milliampères émis par le filament, 300 étaient arrêtés par les barreaux et 300 atteignaient l'anode après avoir traversé le jet. Exceptionnellement, l'intensité avait été portée à 500 millis (électrons de 1 000 volts).

La grille utilisée ensuite, de dimensions plus importantes, avait les mailles carrées de 1 cm. Il en est résulté une augmentation légère du rendement qui est passé de 50 à 55 o/o environ.

La puissance maxima que pouvait absorber cette grille demeurait faible : 7 à 800 watts environ. Ayant atteint 1 kilowatt, j'ai provoqué des fissures dans les barreaux, toujours au voisinage du centre.

Il semble bien préférable de mettre de l'eau dans les barreaux eux-mêmes. J'ai donc enlevé cette grille à mailles carrées et l'ai remplacée par 6 barreaux parallèles constitués par du tube de cuivre plat très mince. La section intérieure du tube était de 1 mm. $\times$ 13 largement suffisante pour laisser passer une grande quantité d'eau. L'épaisseur des parois était de 15/100 de millimètre, beaucoup trop faible pour assurer d'une part une résistance mécanique suffisante et d'autre part un bon écoulement de la chaleur.

A certains endroits des barreaux, le bombardement électronique est particulièrement intense et il se forme une bulle de vapeur malgré la vitesse élevée de circulation d'eau. Avec ce premier montage, j'ai pu atteindre environ 1 ampère également mais n'ai pu aller plus loin sans danger. Le rendement du canon était encore de 50 o/o environ, la pression de l'eau ayant déformé les barreaux, ils offraient une surface beaucoup trop grande au bombardement. Cet essai paraissait encourageant, j'ai fait étirer spécialement du tube de cuivre rouge pur sur un profil un peu différent. L'épaisseur de la lame d'eau a été laissée à 1 mm. dans la partie la plus épaisse et elle va en diminuant du côté opposé au fil. Mais la paroi a été portée de 15/100 à 40/100. De cette façon, on peut espérer donner, par conductibilité dans le métal, une surface plus grande aux points chauds et éviter la formation de bulles de vapeur.

Ces prévisions ont été pleinement confirmées par l'expérience. Avec cette nouvelle grille, le rendement est passé

de $1/2$ à $2/3$: l'intensité du faisceau est le double de celle absorbée par la grille et peut, dans un autre régime qui sera étudié plus loin, atteindre 72 o/o. Le courant total émis par le fil a pu être poussé jusqu'à 6,25 ampères se partageant en 1,75 ampère absorbé par la grille et 4,5 traversant le jet.

Il est d'ailleurs probable que cette intensité peut encore être augmentée dans des proportions considérables, mais je n'ai pas actuellement de source d'alimentation assez puissante. On pouvait penser à un mode de réalisation tout à fait différent pour ces grilles accélératrices : utilisation de barreaux de tungstène se refroidissant par rayonnement. Quelques essais tentés dans cette voie m'ont indiqué que les puissances utilisables étaient très inférieures. De plus la température très élevée atteinte par le tungstène lui permet d'émettre des électrons, ce qui peut être gênant.

5. Le fil émetteur d'électrons. — J'ai toujours utilisé du tungstène qui a l'inconvénient d'absorber beaucoup d'énergie par son chauffage. Par contre l'émission est parfaitement régulière et stable. La durée considérable permet des changements très rares. Enfin le fil est très robuste et une surcharge accidentelle est sans importance.

Au début, le fil avait environ $3/10$ et consommait quelques ampères. Pour la première grille refroidie, le fil avait la forme d'une spirale plane. Avec un diamètre de $8/10$, la consommation était de 30 ampères sous 16 volts.

Pour le nouvel appareil (grille à mailles carrées puis à barreaux refroidis) le diamètre avait été porté à $15/10$. Le courant de chauffage à 95 ampères sous 12 volts.

Le fil n'ayant pas une tenue mécanique suffisante, son diamètre a encore été augmenté et porté à $20/10$. Le courant de chauffage atteint 140 ampères sous 10 volts. Le courant de saturation doit être d'environ une dizaine d'ampères.

Le fil étant placé dans un champ de 1 000 gauss environ

est soumis à des forces électromagnétiques intenses et il a fallu renoncer au chauffage en courant alternatif.

La grille accélératrice étant réunie au sol, il s'ensuit que le filament est sous tension. La génératrice qui l'alimente est donc entraînée par un manchon isolant et fonctionne en auto-excitation.

Un rhéostat d'induit en série avec le fil et des rhéostats d'excitation ont des poignées isolantes et peuvent être commandés sans danger. Le rhéostat d'induit est absolument nécessaire pour l'allumage progressif du fil. Il faut commencer par couper le circuit du chauffage pour amorcer la dynamo, la résistance à froid du fil étant beaucoup trop faible pour permettre l'amorçage. Quand le fil est chaud, le rhéostat d'induit est ramené à zéro pour diminuer la consommation d'énergie et le réglage de l'émission du fil s'obtient par l'excitation. Le canon étant, au moins pour les faibles intensités à peu près saturé, l'émission varie très vite avec le courant de chauffage. Il est donc tout à fait nécessaire de régler ce dernier d'une manière très précise. On y arrive très aisément en montant deux rhéostats en parallèle l'un sur l'autre, l'un étant 10 fois plus résistant que l'autre. Il est facile de maintenir l'émission du fil constante à ± 3 o/o et on peut, quand il y a lieu, arriver à ± 1 o/o.

6. Electrons lents. — J'ai voulu, pour étudier les modifications de la lumière émise par le jet, réduire autant que possible, la vitesse des électrons du faisceau. La méthode la plus simple était évidemment de diminuer la différence de potentiel entre le fil et la grille. Mais je me suis trouvé rapidement arrêté dans cette voie par la diminution du courant. Le champ électrique à la surface du fil était trop faible pour amener une émission électronique notable. J'ai alors placé entre le fil et la grille une deuxième grille accélératrice en fil de tungstène (la place était trop limitée pour pouvoir loger une grille refroidie).

Cette première grille est portée à un haut potentiel et donne sur le fil un champ suffisant pour assurer une bonne émission.

La grille principale et l'anode sont portées à un potentiel positif beaucoup plus faible. Les électrons accélérés par la première grille sont ainsi ralentis par le champ électrique régnant entre celle-ci et la grille principale et traversent aussi le jet à faible vitesse.

J'ai pu avec ce montage obtenir les résultats suivants :

Emission totale du fil	220 millis
1 ^{re} grille (accélétratrice)	50 millis sous 700 volts
2 ^e grille (retardatrice)	65 millis sous 70 volts
Anode	105 millis sous 70 volts

Le montage normal (sans ralentissement des électrons) conduisait, en mettant seulement 70 volts au lieu de 700 sur la première grille, aux chiffres suivants :

Emission totale du fil	7,5 millis
1 ^{re} grille	2,5 millis sous 70 volts
2 ^e grille	1 millis sous 70 volts
Anode	4 millis sous 70 volts

On voit que la méthode utilisée ici augmente beaucoup l'intensité du faisceau d'électrons lents dont on peut disposer.

CHAPITRE VI

Méthode pour l'étude de la chaleur spécifique des corps à haute température.

Bien que l'étude des chaleurs spécifiques des solides à haute température soit tout à fait étrangère au sujet principal des recherches décrites dans ce travail, je désire indiquer sommairement une méthode qui paraît susceptible de rendre quelques services.

1. Principe. — J'ai été conduit à faire les essais très sommaires que je vais décrire maintenant par l'étude du fonctionnement des fours à bombardement électronique de l'appareil à jet atomique.

Le corps à étudier, par exemple, de forme sphérique, est suspendu dans un très bon vide et complètement isolé thermiquement de son support de façon à rendre négligeables les pertes par conductibilité thermique devant le rayonnement. Un petit fil de tungstène est placé au voisinage et, en établissant une différence de potentiel V entre le fil et le corps, il passe un courant i . Négligeant en première approximation le rayonnement du fil et la conductibilité du support, le corps reçoit par seconde la quantité d'énergie iV . Soit C la chaleur spécifique, W_T la puissance qu'il rayonne à la température T , ΔT (supposé très petit devant T) la quantité dont augmente T en une seconde, on a évidemment :

$$iV = W_T + C\Delta T$$

qui permet de calculer C , connaissant W et ΔT , W_T se mesure très simplement : il suffit de maintenir i et V constants. La

température commence par augmenter puis se stabilise à la valeur T quand les pertes par rayonnement sont exactement compensées par l'afflux de chaleur dû aux électrons. L'égalité ci-dessus fournit donc immédiatement C .

Un autre procédé consiste à porter le corps à haute température et à le laisser refroidir après arrêt du chauffage.

Connaissant la fonction $W_T = f(T)$ de la quantité d'énergie rayonnée en fonction de la température, la courbe de refroidissement en fonction du temps $T = \varphi(t)$ donne la chaleur spécifique.

Cette méthode semble intéressante, car elle donne des résultats d'autant plus précis que la température est plus élevée. En effet, les pertes de chaleur par la conductibilité thermique du support et des fils de couple croissent moins vite que la température puisque la conductibilité des métaux va, en général, en diminuant quand la température monte, tandis que la puissance rayonnée par la sphère croît presque exactement suivant la 4^e puissance de T .

Cette méthode donne en plus le coefficient :

$$A = \frac{W}{T^4} ;$$

elle permet donc de savoir si le corps en essai est plus ou moins noir.

2. Dispositif expérimental. — L'échantillon du corps en essai (cuivré ou acier) était une sphère de 40 mm. de diamètre. A l'intérieur, était logée la soudure d'un couple platine-platine rhodié. Les fils très longs et fins n'emportaient par conductibilité qu'une quantité de chaleur négligeable. La résistance mécanique des fils du couple étant insuffisante pour supporter le poids de la sphère, celle-ci était suspendue à un fil de tungstène. Il était ainsi possible de ne pas perturber les indications du couple par le passage du courant électronique de chauffage à travers un de ses fils.

Le fil émetteur d'électrons était placé à proximité de la sphère. La différence de potentiel entre le fil et la sphère était comprise entre 6 et 10 000 volts et le courant entre 1 et 10 milliampères. La puissance variait ainsi de quelques watts à une centaine.

3. Quelques essais sommaires de vérification. — J'ai utilisé pour faire un essai grossier de la méthode une sphère de cuivre. La chaleur spécifique de ce métal a pour valeurs :

0,093 à 15°
0,094 à 100°
0,096 à 200°
0,099 à 300°

La mesure a donné les chiffres suivants :

0,103 à 60°
0,115 à 100°
0,134 à 150°
0,132 à 200°
0,124 à 250°
0,122 à 300°
0,120 à 350°
0,114 à 400°

L'erreur est évidemment considérable. Elle est probablement due en majorité à la raison suivante : le fil est placé très près de la boule, mais malgré cela tous les électrons ne vont pas sur celle-ci. Une fraction va frapper directement les parois du tube. La puissance attribuée à la sphère est donc trop grande, ce qui amène une erreur par excès sur la chaleur spécifique.

Ayant placé sous le fil une pièce de concentration destinée à empêcher autant que possible la dispersion des électrons dans le tube une nouvelle mesure de chaleur spécifique du cuivre à 400° a donné la valeur $C = 0,103$, qui n'est plus

très éloignée de la valeur réelle, étant donné qu'il s'agissait d'un montage tout à fait sommaire.

Désirant vérifier la possibilité de faire des mesures à température plus élevée, j'ai remplacé la sphère de cuivre par une sphère d'acier également très bien polie (bille de roulement).

J'ai pu monter jusqu'à 1340° C. Les mesures de chaleur spécifique ont été assez mauvaises, mais j'ai cependant pu observer aisément le point de Curie et le deuxième point de transformation du fer situé au voisinage de 1280° .

Bien que n'occupant qu'un intervalle de quelques degrés, ce point est parfaitement visible sur la courbe de refroidissement en fonction du temps.

Comme la sphère était très bien polie, la puissance rayonnée était très faible. A 1340° C., elle était seulement de 80 watts. Le diamètre de la sphère étant de 40 mm. on trouve aussi pour le coefficient de la formule $W = AT^4$ la valeur :

$$0,23 \cdot 10^{-12}$$

soit environ le $1/20$ de celui du corps noir. J'ai essayé de rapprocher la sphère polie du corps noir. Pour cela, je l'ai recouverte d'une couche mate de noir de fumée. Le coefficient est monté à la valeur $4,58 \cdot 10^{-12}$. On sait que pour le corps noir, il est $5,7 \cdot 10^{-12}$. La sphère était donc devenue presque noire. A 510° C., elle rayonnait 100 watts après noircissement et 5 watts à l'état poli.

Il semble, malgré que les essais ci-dessus soient des plus rudimentaires, que cette méthode puisse conduire à des résultats excellents.

4. Ce qu'il y aurait lieu de faire. — Il y aurait lieu de creuser une cavité dans la sphère et d'y loger le fil émetteur d'électrons. En utilisant une enceinte métallique portée au même potentiel que le fil au lieu d'une enceinte de verre, tous les électrons iraient directement sur la sphère. Il fau-

drait dans ce cas évidemment ajouter à la puissance des électrons le nombre de watts dépensé dans le fil puisqu'il contribuerait ainsi au chauffage par son rayonnement. Cela ne représente d'ailleurs qu'une très faible correction.

5. Cas des très hautes températures. — La méthode paraît particulièrement intéressante pour les très hautes températures (cas du carbone par exemple ou des métaux très peu fusibles).

En effet, j'ai pu vérifier qu'il n'y avait aucune difficulté à obtenir des températures très élevées au moyen de bombardements électroniques.

J'ai empilé plusieurs rondelles de graphite les unes au-dessus des autres. Au-dessus de cette pile, j'ai placé un gros filament de tungstène en forme de spirale plane (fil de 8/10 consommant 31 ampères sous 16 volts). La chaleur rayonnée par le fil suffisait pour porter au rouge clair la pastille supérieure. En mettant 1 000 volts environ entre le fil et le graphite, on pouvait chauffer le graphite avec les électrons émis par le fil. La température montait très aisément. En regardant le fil se projeter sur la pastille, on le voyait d'abord très brillant, le graphite étant beaucoup moins chaud que lui. La température croissant, le fil semblait disparaître pour réapparaître ensuite, mais, cette fois-ci, il se détachait en sombre sur le fond beaucoup plus blanc de la pastille. On peut ainsi faire croître la température jusqu'à ce que le carbone se vaporise. Un arc s'allume alors entre le fil et la pastille, ce qui met fin à l'expérience et il semble difficile d'aller plus loin. La température a certainement dépassé 3000°.

mais la puissance rayonnée par le graphite devenant alors considérable : de l'ordre de 1 kilowatt par centimètre carré.

Il faut opérer dans une enceinte métallique refroidie par circulation d'eau et regarder de préférence à travers du quartz fendu, le verre supportant mal un rayonnement aussi intense.

CHAPITRE VII

Production d'ions à partir du jet.

J'ai, dans les pages précédentes, décrit les diverses parties de l'appareillage permettant de produire des ions positifs et je veux maintenant indiquer les résultats successivement obtenus. Je terminerai ensuite par les tentatives d'utilisation de ces ions actuellement en cours de réalisation.

1. Premiers essais avec appareils de verre (mercure). — Ils n'ont amené aucun résultat, ce qui est dû à plusieurs raisons : intensité électronique insuffisante, mauvaise disposition géométrique des appareils qui, éloignant la production du jet du faisceau atomique, en diminuait beaucoup l'intensité à l'endroit utile. Enfin, vide très insuffisant pour permettre de déceler le courant d'ions utiles parmi ceux dus au gaz restant.

2. Appareils métalliques (mercure). — Le premier résultat positif a été obtenu après le montage des appareils en métal et de la première pompe à vapeur d'huile.

De plus, l'intensité du courant électronique avait été augmentée.

L'orifice de sortie du jet ayant été placé immédiatement au-dessous du faisceau, la totalité du jet rencontrait les électrons.

Les premiers chiffres ont été les suivants :

Intensité du faisceau d'électrons . . .	300 milliampères
Tension d'accélération des électrons . .	1 200 volts
Courant parasite d'ions positifs dû au passage des électrons dans le gaz restant	40 microampères
Augmentation du courant d'ions résultant du passage du jet à travers le faisceau électronique	2 microampères
Volts négatifs sur l'électrode collectrice des ions.	200 environ
Température du mercure dans le four.	57° environ.

L'effet dû au passage du jet était donc tout petit mais le résultat était cependant acquis. Il était ainsi démontré qu'un jet atomique excité par bombardement électronique pouvait servir de sources d'ions positifs.

L'expérience fut alors recommencée après une évacuation plus soignée du tube qui, toujours pour 300 millis d'électrons, avait abaissé le courant d'ions à 15 μ A environ. J'ai pu ainsi relever quelques points assez incertains d'ailleurs, sur la courbe d'intensité des ions venant du jet en fonction de la température du bain de mercure. J'ai ainsi obtenu :

1	μ A à 47°3
1,5	μ A à 51°
2	μ A à 57°.

La courbe est équivalente à celle de la figure 1 ; mais cette fois-ci obtenue avec un jet et non plus en atmosphère de vapeur. La difficulté expérimentale est ici beaucoup plus grande.

3. Essais avec du cadmium. — La nécessité d'employer un tube métallique m'ayant conduit à utiliser le cadmium comme corps d'étude, j'ai monté un four dans la partie

froide de l'appareil et ai d'abord étudié la production de jets de cadmium plus intenses que ceux obtenus avec le mercure. J'ai disposé devant l'orifice de sortie du jet une plaque de verre, mais celle-ci étant mal refroidie, il y a eu rebondisse-



Fig. 6.

ment des atomes de cadmium sur le verre et le dépôt obtenu n'était pas très régulier. En remplaçant le verre par une plaque de cuivre rouge poli, j'ai obtenu un dépôt parfaitement propre. La plaque de cuivre se trouvait à environ 4 cm. en avant de l'orifice de sortie du jet (le diamètre de celui-ci de 5 mm.). La figure 6 représente

en vraie grandeur le dépôt ainsi obtenu. On voit que les bords en sont parfaitement nets indiquant ainsi un fonctionnement correct de l'ensemble.

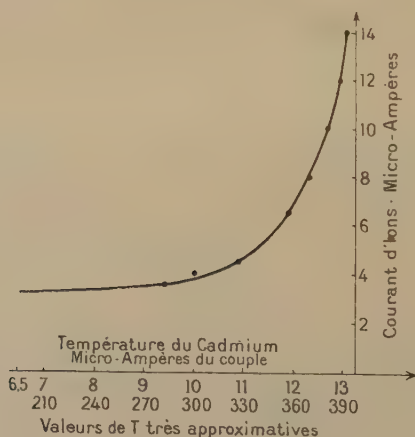


Fig. 7.

J'ai alors repris les essais de production des ions positifs. Mais comme il n'avait pas été possible de placer dans le four

un dispositif d'arrêt du jet permettant de mesurer par différence le courant d'ions utiles, il fallait opérer autrement. Le tube ayant été pompé aussi bien que possible, on chauffait progressivement le four à cadmium en maintenant constante l'intensité du faisceau électronique et on notait le courant total d'ions en fonction de la température du cadmium.

La première courbe obtenue par cette méthode est représentée sur la figure 7.

Les températures indiquées en abscisses sont très approximatives. Le courant d'ions parasites avait été très abaissé par l'utilisation du nouveau tube métallique et était constant depuis la température ambiante. Toute cette partie de la courbe est supprimée sur la figure. On voit bien que l'augmentation du courant d'ions est due au cadmium et la montée très rapide ressemble bien à une courbe de tension de vapeur.

On voit que, dès ce premier essai, le courant d'ions utiles qui était de $1\text{ }\mu\text{A}$ avec le Hg est déjà $10\text{ }\mu\text{A}$. En outre les ions parasites ayant été réduits de 40 à $4\text{ }\mu\text{A}$, la proportion se trouve inversée : la majorité du courant d'ions est due aux ions provenant du jet.

4. Suite des essais avec le cadmium. Utilisation de fours à bombardement électroniques. — Le four, ne donnant pas satisfaction comme il a été dit plus haut, a été remplacé par le four à bombardement électronique. L'uniformité de la température était beaucoup mieux assurée. Le couple ayant été étalonné, j'ai repris les essais.

L'angle d'ouverture du jet étant de 18° environ, j'ai obtenu les résultats de la figure 8.

Le courant atteignait déjà $30\text{ }\mu\text{A}$ au lieu de 10, lors de l'essai précédent.

J'ai ensuite, par diminution de la distance séparant le four et le diaphragme froid, porté de 18° à 30° , l'angle d'ouverture du jet. Cela amène une augmentation dans le rapport de 1 à 2,6 de l'angle solide.

Une nouvelle expérience a fourni la courbe de la figure 9. Le courant d'ions obtenu à température décroissante est très inférieur à celui obtenu à température croissante. Ceci est simplement dû à la rapide diminution de section de l'orifice de sortie du jet.

On voit que le courant d'ions utiles n'a pu dépasser, comme précédemment, 30 μA au cours de cet essai. Mais ce courant

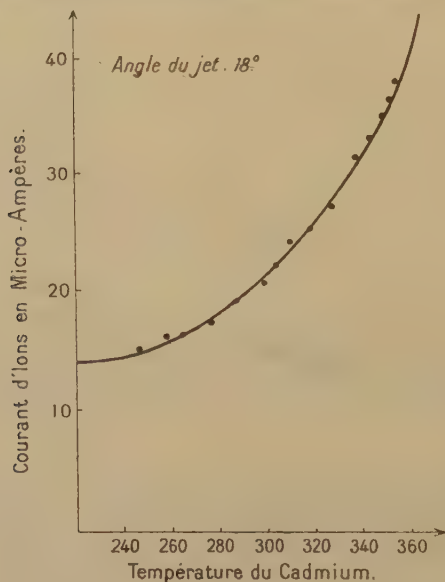


Fig. 8.

a été obtenu à température bien inférieure : 334° au lieu de 368°, marquant ainsi le gain dû à l'augmentation de l'angle d'ouverture du jet.

La confirmation se trouve indiquée sur la figure 10 où se trouvent comparés les courants d'ions obtenus avec les angles de 18° et de 30°. Le rapport des intensités est un peu inférieur au rapport des angles solides, car il est difficile de faire rencontrer la totalité du faisceau d'électrons avec la totalité du jet.

Une autre conséquence de l'augmentation de l'angle d'ouverture, par rapprochement des deux diaphragmes, a été

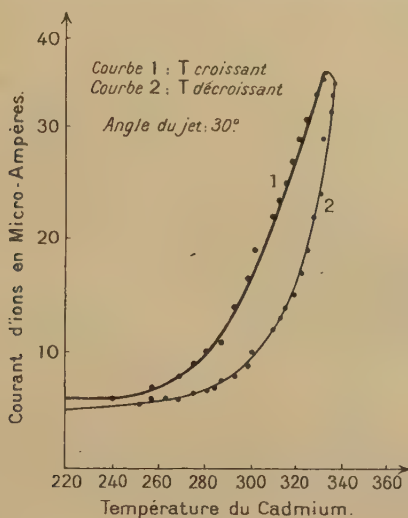


Fig. 9.

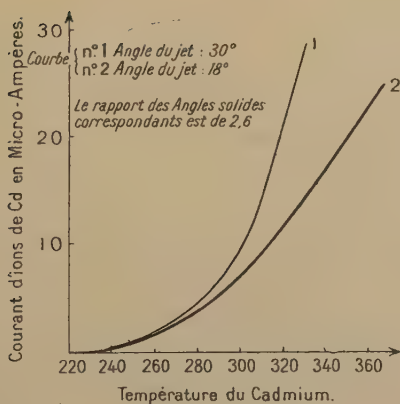


Fig. 10.

l'accroissement de la vitesse d'obstruction du diaphragme froid. C'est pour cette raison qu'il a été impossible d'obtenir

en valeur absolue plus d'ions avec le jet de 30° qu'avec le jet de 18° l'appareil étant bouché avant d'avoir eu le temps d'atteindre sa température de fonctionnement.

J'ai alors apporté au diaphragme froid une modification ne changeant pas l'angle d'ouverture du jet mais ralentissant l'obstruction. En effet, un essai fait dans ces conditions a permis de marcher assez longtemps pour atteindre des températures plus hautes. Le courant d'ions a pu atteindre environ $65 \mu\text{A}$ au lieu de 30 .

5. Nouvelle installation plus puissante. — Il fallait de toute évidence ralentir l'obstruction du diaphragme, augmenter encore l'ouverture du jet et l'intensité du faisceau d'électrons.

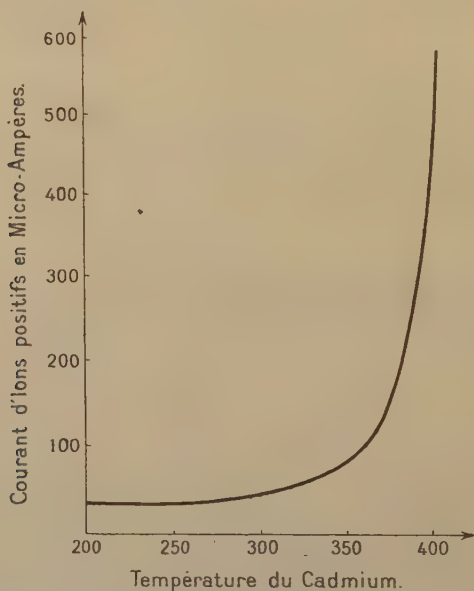


Fig. 11.

Dès le premier essai, malgré une mise au point incomplète, la nouvelle installation s'est révélée infiniment supérieure à l'ancienne.

Avec 200 millis d'électrons seulement, au lieu des 300 antérieurement utilisés, le courant d'ions positifs a été porté à 100 microampères, malgré un très faible chauffage du cadmium.

Un essai ultérieur a été fait en reprenant l'ancienne intensité de 300 millis pour les électrons afin de permettre une comparaison des intensités de jets fournis par les deux appareils. Le chauffage pouvant être fortement augmenté puisque l'obstruction n'est plus à craindre, le courant d'ions est devenu beaucoup plus intense. Cela dispensait également de pousser le vide aussi loin, quelques microampères de plus dans les ions parasites étant maintenant sans grande importance. J'ai pu ainsi relever la courbe de la figure 11. On voit que le courant d'ions a atteint le chiffre de 600 microampères. Ce régime peut être maintenu un temps suffisant pour utiliser les ions produits (quelques heures), alors que sans dispositif protecteur, on ne pouvait marcher que deux ou trois minutes. Le gain réalisé est donc considérable.

6. Apparition d'un nouveau mode de fonctionnement. — Lors de l'essai fait avec 300 millis ci-dessus décrit, le courant d'ions ayant atteint 600 microampères, il est apparu un changement complet dans l'allure du phénomène.

Le courant d'ions a subi une énorme discontinuité, la mesure faite dans de mauvaises conditions a donné 10 millis d'ions. Ce phénomène n'apparaît qu'avec un jet très intense. Si on augmente l'intensité des électrons, il apparaît pour une intensité de jet un peu plus faible et inversement, au moins dans des limites actuellement réalisables. Il semble probable que si la densité d'ions créés dans le jet par le passage des électrons atteint une certaine valeur, les ions se repoussent les uns les autres et prennent une vitesse suffisante pour devenir eux-mêmes des agents ionisants énergiques.

Néanmoins, il ne s'agit pas du tout d'une décharge entre-

tenue comme dans un tube à gaz normal. La présence du faisceau d'électrons est indispensable et si on le réduit, le phénomène disparaît et on retrouve le premier état avec un courant d'ions de l'ordre du milliampère.

Ayant par la suite légèrement augmenté l'intensité électronique le courant total d'ions positifs a atteint environ 40 milliampères. Son intensité, lorsque le courant traversant le jet atteint plusieurs ampères, n'est pas encore connue avec précision, les essais étant en cours.

Note ajoutée à la correction des épreuves :

Il a été possible d'extraire du jet un courant atteignant 80 milliampères. Ce courant n'a semblé limité que par la puissance de la source accélérant les électrons et pourrait probablement être encore augmenté si le besoin s'en faisait sentir.

CHAPITRE VIII

Premiers essais d'extraction des ions positifs.

1. Position du problème. — Les ions sont créés à l'intersection du faisceau électronique et du jet atomique et il semble évidemment nécessaire de les extraire de la chambre d'expériences pour les amener dans une autre partie de l'appareil où ils pourront être soit étudiés, soit utilisés.

Il faut donc créer un faisceau d'ions positifs, autant que possible à peu près parallèle joignant ces deux endroits. On est ainsi conduit à un problème d'optique ionique.

La solution semble devoir être purement électrostatique, les lentilles magnétiques habituellement utilisées en optique électronique perturberaient complètement le faisceau d'électrons et son champ magnétique, alors que les champs électriques des lentilles électrostatiques ne le déplacent pratiquement pas.

2. Premiers essais rudimentaires. — L'électrode sur laquelle sont recueillis et mesurés les courants d'ions positifs se composait au début des essais d'un simple tube isolé fermé par une glace, à travers laquelle on pouvait voir l'intérieur de la chambre d'expériences. Elle était portée à un potentiel négatif assez élevé (de quelques centaines à quelques milliers de volts) suffisant pour collecter la totalité des ions produits par le passage des électrons. C'est avec ce montage qu'ont été faites toutes les mesures ci-dessus décrites.

Mais avant même que la source d'ions soit devenue vérita-

blement utilisable, je m'étais déjà préoccupé du problème de l'extraction des ions hors du lieu de production.

Les premiers essais dans ce sens ont été faits de la manière suivante :

Le tube servant d'électrodes a été pourvu du côté de la chambre d'une grille à mailles carrées assez larges et en fil fin. On définit ainsi approximativement une première surface équipotentielle. A l'autre extrémité, le fond de verre a été remplacé par un fond métallique isolé du tube et permettant ainsi de mesurer séparément les courants débités par les deux morceaux de l'électrode.

Les premiers essais ont été faits avec le même potentiel sur les deux. Le courant se partageait sensiblement en deux pour la grille et un pour le fond. Le rendement de la grille était ainsi d'environ 30 o/o. Ce n'était pas beaucoup mais suffisant à montrer une possibilité d'extraction. Ces essais furent abandonnés pour achever la mise au point de la production des ions.

3. Essais en cours. — Dans le nouvel appareil, l'électrode collectrice est beaucoup plus compliquée. Elle se compose d'une grille placée, comme précédemment, au voisinage immédiat du jet. Viennent ensuite deux tubes concentriques formant lentilles électrostatiques et un fond plat fermant le tout. Ces diverses pièces sont isolées les unes des autres et peuvent être portées à des potentiels différents.

J'ai commencé par étudier le fonctionnement de ces lentilles pour de faibles densités d'ions, le jet était donc réglé pour demeurer sur le premier régime.

Le problème consistait à amener la plus grande quantité possible d'ions positifs sur le fond plat, et à en perdre aussi peu que possible sur la grille et les tubes intermédiaires.

En opérant avec un courant total d'environ 600 microampères, j'ai pu réussir, après quelques tâtonnements pré-

liminaires, à faire venir sur le fond plat 530 microampères. Le courant d'ions, perdus sur la grille d'entrée, était seulement de 50 microampères, soit moins de 9 0/0 du total. Avec ce réglage, les électrodes intermédiaires débitent des courants de sens contraire ayant pour intensités 70 et 40 microampères environ. Ce sont des électrons secondaires émis par le fond sous l'influence du bombardement des ions. Une petite partie de ces courants peut être due à des ions positifs. Il semble néanmoins que la répartition des courants ainsi obtenue puisse être considérée comme satisfaisante.

Il n'en est plus de même lorsque le jet est dans son deuxième état : le courant d'ions est beaucoup plus grand, mais sa répartition est moins bonne : la grille d'entrée débite un courant important et les électrodes situées derrière elle des intensités de moins en moins grandes.

Cependant les essais actuellement en cours permettent d'espérer une amélioration notable.

Malgré cela, la quantité de cadmium transportée sous forme d'ions positifs est déjà suffisante pour produire des dépôts de cadmium métallique parfaitement visibles au bout de quelques minutes sur l'électrode.

Note ajoutée à la correction des épreuves :

Une étude approfondie du fonctionnement de la lentille avec de grandes intensités d'ions (de 20 à 30 millis) a révélé le rôle prépondérant joué par la charge d'espace dans le faisceau. Des champs électrostatiques à symétrie axiale de forme convenable ont permis de faire arriver sur l'électrode réceptrice portée à un potentiel d'une trentaine de kilovolts la presque totalité des ions extraits du jet. Ces essais ne sont pas encore publiés. Une nouvelle source puissante fournissant une centaine de kilovolts a été montée et commence à être utilisée.

CHAPITRE IX

Étude très sommaire de la lumière émise par le jet.

1. Photographie du jet. — Le jet de cadmium est suffisamment intense pour être illuminé par le passage du faisceau d'électrons.

Le tube étant bien vidé, le passage des électrons ne donne aucune luminosité dans le gaz restant, quelle que soit l'intensité du faisceau. Si on chauffe le four progressivement lorsque la température du cadmium atteint 250° environ, le jet commence à devenir très faiblement visible aux endroits de densité électronique maxima (Le faisceau, issu d'un fil enroulé en spirale situé derrière une grille à barreaux parallèles, est très loin d'être homogène). Le jet apparaît, pour l'observation visuelle, de couleur violette de même teinte que la raie 4 145 du cadmium. A mesure que la température augmente, la luminosité du jet croît très rapidement et il devient très aisé de le photographier. La photographie de la figure 12 est faite suivant la direction normalement utilisée pour la collection des ions positifs. On voit les deux grilles métalliques servant à définir le champ électrostatique extrayant les ions. Entre elles, à la partie inférieure, se trouve le sommet de l'appareil avec l'orifice de sortie du jet et à la partie supérieure on voit le fond du piège à air liquide dans lequel il va se condenser. Enfin, au milieu, on voit le jet rendu lumineux par le passage des électrons.



Fig. 12.

Le fil utilisé pour l'émission du faisceau avait eu la partie centrale enlevée de sorte que le faisceau électronique avait à peu près la forme d'un tube. On en voit les deux contours apparents en haut et en bas. Le jet a bien la forme prévue imposée par les diaphragmes qui le délimitent.

La photo a été obtenue avec 20 secondes de pose sur plaque panchromatique et un objectif ouvert à $f/8$ environ.

J'ai indiqué au chapitre précédent que si la température du cadmium est portée à une valeur sensiblement plus élevée, une discontinuité dans le courant d'ions se produit. En même temps la couleur change pour prendre presque exactement celle de la raie 4800. La lumière émise croît dans de très grandes proportions. Les bords du jet ne demeurent plus aussi nets, surtout à la partie supérieure. En réduisant le temps de pose à deux secondes la plaque est encore fortement surexposée. L'éclat visuel du jet dans ce régime devient du même ordre de grandeur que celui des tubes à vapeur de cadmium excités par une décharge de haute fréquence sans électrodes.

2. Etude spectroscopique de la lumière émise. — A. — *Dans le spectre visible.* — J'ai pris quelques clichés spectroscopiques pour examiner très sommairement le spectre d'émission ainsi obtenu. Les premiers ont été faits avec un spectroscopie en verre de Hilger ne donnant ainsi que la partie visible du spectre. On y trouve toutes les principales raies d'arc du cadmium depuis la raie rouge jusqu'à la limite d'absorption du spectroscopie : 6438, 5154, 5086, 4882, 4800, 4678, 4662, 4415, 4307.

B. — *Dans le proche ultra-violet.* — J'ai ensuite remplacé le spectroscopie de Hilger par un appareil en quartz du type Féry bien connu. Le tube ayant été fermé par une fenêtre de quartz transparent d'environ 1 mm. 5 d'épaisseur, j'ai pu obtenir des raies depuis le visible jusqu'à la longueur d'onde ≈ 162 environ, à la limite de ce que pouvait donner le spec-

troscope utilisé. Je n'ai pris que quelques clichés : le but principal du travail étant surtout l'étude des ions positifs. Je tiens cependant à signaler cette étude extrêmement sommaire, car elle semble susceptible de développements qui pourraient, peut-être, fournir des indications intéressantes.

Je me suis attaché surtout à l'étude de 3 spectres. Dans l'un, la vitesse des électrons traversant le jet avait été réduite à 70 volts. Malheureusement, il en était résulté une réduction de l'intensité du faisceau de 300 à 100 millis environ. Le temps de pose a été de 10 minutes. Dans le deuxième, le temps de pose a été de 1 heure, l'intensité des électrons de 200 millis accélérés sous 1 000 volts.

Enfin, dans le troisième, le jet était au régime intense. Le temps de pose a été réduit à 2 minutes.

Les 3 clichés ainsi obtenus (plaque Opta lumière) ont des intensités assez voisines et peuvent être comparés raisonnablement entre eux.

Cependant les conditions étant très différentes, il est impossible d'en tirer des conclusions pour les valeurs des fonctions d'excitation des diverses raies en valeur absolue. On pourra seulement voir dans un même cliché les variations relatives des spectres des divers ordres. J'ai l'intention de refaire quelques spectres dans des conditions d'exposition aussi identiques que possible pour essayer d'avoir des indications sur les valeurs vraies des fonctions d'excitation lorsque la vitesse de l'électron incident varie.

Je pense que dans le premier état du jet (état violet) la charge d'espace due aux ions positifs dans le jet demeure faible et n'altère que peu la vitesse de l'électron au moment du choc. Donc, le deuxième état, au contraire (état bleu), cette charge d'espace doit être considérable et la vitesse de l'électron grandement perturbée. Malheureusement sa mesure semble très difficile sinon impossible.

Il est évident, en effet, que l'introduction d'une sonde par exemple dans le jet perturberait complètement la répartition

des charges. De plus, cette électrode devrait être énergiquement refroidie pour ne pas être immédiatement volatilisée dans le faisceau, fut-elle en tungstène. Son volume serait donc très important. Cette méthode semble impraticable.

Les raies sont en nombre à peu près égal sur les deux premiers mais ne sont pas exactement les mêmes dans les deux cas. Le troisième a un nombre de raies environ 3 fois plus grand et toutes les raies des deux premiers avec beaucoup d'autres en supplément et les raies communes y sont toujours les plus intenses.

J'ai mesuré les longueurs d'ondes sans chercher beaucoup de précision puisqu'il s'agissait simplement d'identifier des raies de longueurs d'ondes connues. Les intensités ont été estimées par vision directe et graduées de 0 à 10, l'intensité 0 correspondant aux raies placées à la limite de perception lors de l'observation avec le microscope de la machine à mesurer. Les longueurs d'ondes données sont celles des Tables de Kayser et d'Esclangon pour les ordres 3 et 4. Quelques raies ont été observées en dehors des Tables d'Esclangon. Elles appartiennent vraisemblablement à des ordres d'ionisation élevés. Leurs longueurs d'ondes n'étant connues qu'avec une approximation assez grossière ne sont pas données.

Le tube étant bien vidé il n'y a pratiquement pas de raies parasites dues au gaz restant et le cadmium utilisé étant très pur (cadmium fourni par Kahlbaum) n'en fournit pas non plus, ce qui facilite le travail de classement.

On peut faire sur la liste ci-après les remarques suivantes :

Lorsque la tension d'accélération des électrons passe de 70 à 500 volts, on a pour le spectre de premier ordre :

- 2 raies renforcées ;
- 9 conservent leur intensité ;
- 30 sont affaiblies.

Pour le deuxième ordre :

- 19 raies renforcées ;
2 conservent leur intensité ;
4 sont affaiblies.

Pour le troisième ordre :

- 10 raies sont renforcées ;
1 est affaiblie.

Pour le quatrième ordre :

- 6 raies renforcées ;
3 conservent leur intensité ;
1 est affaiblie.

Longueur d'onde	Termes	Intensité des raies			Origine des raies
		Electrons de 70 V.	Electrons de 500 V.	Régime bleu	
2 162,9		0	0	1	II
2 204				0	II
2 210				0	II
2 269,8		2	2	2	II
2 288	$1^1S_0-2^3P_1$	4	3	6	I
2 294,3				0	II
2 306,6	$2^3P_1-2^3P_0$	3	0	3	I
2 316,3		0		2	II
2 376,8				1	II
2 418,3				2	III
2 418,7				2	II
2 426,4				1	III
2 443,7				0	II
2 457,9	$2^3P_0-8^3D$			0	I
2 469,8		1		3	II
2 487	$2^3P_1-8^3D_2$			0	I
2 489,5		2	0	1	IV
2 494,2				0	I
2 497,3			1	3	IV
2 507,8	$2^3P_2-11^3S$			0	I
2 517,4				0	IV
2 524,7	$2^3P_2-10^3D$	2	0	2	I
2 541,6	$2^3P_2-9^3D$	1		0	I
2 544,7	$2^3P_0-6^3D$	2		2	I
2 549,9				0	IV
2 550,7		0		0	IV
2 566,0		1		1	IV
2 573,0		3	1	4	II
2 580,3		3	0	3	III

Longueur d'onde	Termes	Intensité des raies			Origine des raies
		Electrons de 70 V.	Electrons de 500 V.	Régime bleu	
2 585,8				0	IV
2 592,4		0		1	IV
2 602,2	$2^3P_2-7^3D_1$	3	0		I
2 618,9			0		III
2 629	$2^3P_1-5^3S$	1			I
2 630,6				0	III
2 632,3	$2^3P_0-6^3S_0$	1		1	I
2 639,5	$2^3P_0-5^3D$	3	0	3	I
2 643,8				0	IV
2 660,4	$2^3P_2-6^3D_3$	3	1	3	I
2 668,2		0		0	II
2 673				0	IV
2 677,6	$2^3P_1-5^3D_2$	3	1	4	I
2 707,1		3	0	3	II
2 712,6	$2^3P_2-5^3S$	2		2	I
2 733,8	$2^3P_0-4^3S_1$	1		2	I
2 748,6		3	2	5	II
2 763,9	$2^3P_2-5^3D_3$	5	2	5	I
2 767,1		0	1	3	III
2 776		0		0	II
2 805,6			1	2	III
2 833,2		0		1	IV
2 835,9		3	2	5	IV
2 856,4				0	II
2 868,3	$2^3P_2-4^3S_1$	3	1	3	I
2 877,5		3	2	6	IV
2 911,6				0	II
2 914,7				1	II
2 929,3				1	II
2 980,7	$2^3P_2-4^3D_2$	6	2	9	I
2 987,2				0	III
2 996,5				0	III
3 001,2	$2^3P_1-4^1D$	1	0	1	I
3 030,7				0	II
3 035,7				2	III
3 048,8			0	0	III
3 053,1				0	III
3 059,3				0	III
3 064,9				0	II
3 068,8				0	II
3 073,6				0	III
3 076,7				0	III
3 081	$2^3P_0-3^3S_1$	3	0	4	I
3 082,7	$2^3P_1-3^1S$	1		1	I
3 084,9				1	III
3 087,1				0	IV
3 089,1				1	III
3 099,6				0	IV
3 101,9				0	IV
3 103,5				0	IV

Longueur d'onde	Termes	Intensité des raies			Origine des raies
		Electrons de 70 V.	Electrons de 500 V.	Régime bleu	
3 104,6				0	IV
3 107,8				0	IV
3 110,7		2	1	6	IV
3 112,9	$2^3P_1-3^3S_1$			0	IV
3 121,8				0	IV
3 129,2				0	III
3 133,3				0	I
3 250,3		5	7	7	II
3 252,5	$2^3P-3^3S_1$	6	3	4	I
3 258,5				7	III
3 261,1	$1^1S_0-2^3P_1$	10	9	10	I
3 355,3				0	II
3 385,5		0		3	II
3 389,8				1	III
3 403,6	$2^3P_1-3^3D_2$	6	3	5	I
3 417,4				1	II
3 423,5				0	III
3 466,3		8	5	8	I
3 486				0	III
3 490,5				0	IV
3 495,3		1	0	0	II
3 500	$2^3P_1-3^1D_2$	3	1	4	I
3 525				0	III
3 532,9				0	III
3 535,7		5	5	6	II
3 610,7	$2^3P_2-3^3D_3$	9	5	9	I
3 612,9	$2^3P_2-3^3D_2$			5	I
3 645	2^1P-9^1D	2		2	I
3 649,6	$2^3P_2-3^1D$	2		2	I
3 667				1	II
3 695,9	2^1P-8^1D	0		0	I
3 768,1		1	0	0	II
3 819	2^1P-6^1S	1		0	I
3 905		1		0	I
3 957,4	2^1P-6^1D			1	II
3 981,8	$2^1P-5^1S_0$	2	1	0	I
4 006,7		0		1	II
4 029,1				1	II
4 094				0	II
4 112				0	II
4 134	$6^3P_2-7^3D_3$	0		2	I
4 141	2^1P-5^1D	1		0	I
4 245				0	II
4 307	$2^1P_1-4^1S_0$	5	2	3	I
4 414,6	$2^3P_1-2^1S_0$	9	9	10	I
4 662	$2^1P_1-4^1D_2$	7	4	8	I
4 678	$2^3P_0-2^3S_1$	8	3	10	I
4 800	$2^3P_1-2^3S_1$	9	4	10	I
5 086	$2^3P_2-2^3S_1$	4	0	7	I
5. 154	2^1P-3^1S	1		1	I

Pour autant que l'on puisse conclure d'une étude aussi rudimentaire, il semble que l'augmentation de la vitesse des électrons renforce beaucoup l'émission des raies d'ordres élevés par rapport aux raies d'arc.

Lorsque le jet est dans l'état bleu, on trouve au voisinage immédiat des deux raies de résonance 2 288 et 3 261 des bandes qui sont probablement dues à la molécule Cd^2 . Elles sont particulièrement intenses au voisinage de la raie 3 261 et s'étendent sur environ 30 Å de chaque côté. Elles ne paraissent pas analogues à celles signalées par Cramm (*Phys. Rev.*, 46, 1934, 205).

La figure 12 donne le tracé de cette région obtenu au microphotomètre.



Fig. 13.

Note ajoutée à la correction des épreuves :

Lors des essais les plus récents, l'intensité du faisceau électronique ayant été portée de quelques centaines de milliampères à quelques ampères, l'éclat du jet s'est naturellement trouvé très renforcé. On peut maintenant le soutenir difficilement à l'œil nu et on peut penser que le spectre émis doit être plus riche en raies et en bandes.

3. Ce qu'il y aurait lieu de faire. — La source de lumière ainsi constituée par le bombardement du jet fournit peut-être des radiations caractéristiques de longueur d'onde très courte, jusqu'à la fréquence :

$$\nu = \frac{eV}{h} .$$

La partie la plus intéressante du rayonnement émis doit se trouver beaucoup plus loin dans l'ultra-violet. Il faudrait développer l'étude spectroscopique en utilisant des spectroscopes à réseau tangent dans le vide. On devrait ainsi pouvoir suivre l'apparition successive des spectres des divers ordres lorsque la vitesse des électrons croît.

Si ces vues étaient confirmées par l'expérience, on aurait ainsi réalisé une source de lumière fournissant un spectre s'étendant depuis le visible (et même peut-être l'infra-rouge, car la raie rouge est émise avec une très forte intensité) jusqu'aux rayons X.

Je n'ai pu faire cette vérification expérimentale n'ayant pas à ma disposition de spectroscopie à réseau tangent dans le vide. Il y aurait lieu d'en réaliser un se montant directement sur le tube à la place de l'électrode collectant les ions. Cette étude serait, de plus, extrêmement longue et je n'ai pas eu le temps de l'entreprendre malgré son intérêt certain.

Dans le cas où l'émission s'étendrait jusqu'aux rayons X, la comparaison des raies émises par les atomes à l'état de vapeur dans le jet avec celles provenant d'un tube ordinaire à anticathode métallique fournirait des renseignements intéressants sur le mécanisme d'émission. Les raies L du cadmium situées aux environs de $4 \text{ \AA}$ devraient en particulier se prêter à cette étude.

L'émission lumineuse d'un jet bombardé par des électrons se prête également très bien, en utilisant un jet peu ouvert, à l'étude de la structure hyperfine des raies comme l'ont montré Brück et Minkowski (*Z. f. P. : Die Intensitätsverteilung der roten Cd Linie im Molekularstrahl bei Anregung durch Elektronenstoc*z (1935), 284).

Note ajoutée à la correction des épreuves :

Un spectroscopie à réseau tangent spécialement dessiné pour l'étude des très courtes longueurs d'ondes est en cours de réalisation. Il servira à tenter les expériences indiquées ci-dessus.

CONCLUSIONS

J'espère avoir montré au cours de ce travail le parti que l'on peut tirer pour la production d'ions positifs du bombardement électronique d'un jet atomique. Les grands avantages que procure l'utilisation d'un jet au lieu de l'atmosphère diffuse généralement utilisée sont de permettre aisément le maintien d'une pression très basse dans tout l'appareil et de bien connaître les conditions de choc. L'extraction et l'analyse des ions créés ainsi que leur utilisation ultérieure se trouvent ainsi grandement facilitées.

Cette méthode d'excitation des jets semble également très intéressante au point de vue spectroscopique par les conditions bien définies qu'elle fournit sur l'excitation de l'atome émetteur.

Note ajoutée à la correction des épreuves :

La méthode du jet moléculaire a été étendue au gaz.

Un ensemble nouveau peut être monté sur le tube principal à la place de l'appareil à jet atomique de Cadmium en conservant le canon à électron et les électrodes accélératrices d'ions.

La collimation du jet est obtenue au moyen de pompes suivant la technique bien connue. Elle est beaucoup moins parfaite que celle fournie par la condensation. Il serait très avantageux de disposer de condenseurs à hydrogène liquide pour les gaz usuels et à hélium liquide pour l'hydrogène.

Néanmoins cet appareillage a déjà fourni des ions d'hydrogène et d'azote en quantités considérables dépassant 20 milliampères dès les premiers essais.

L'expérience confirme bien qu'il est beaucoup plus aisé de réunir les ions très légers en faisceaux que ceux de cadmium. Les essais d'accélération entrepris avec la grande source de 100 kilovolts semblent très encourageants.

Des courants d'ions d'hydrogène de plusieurs milles ont déjà été accélérés sous une tension dépassant 60 kilovolts.

DEUXIÈME THÈSE

PROPOSITIONS DONNÉES PAR LA FACULTÉ

Supraconductivité

VU ET APPROUVÉ :

Paris, le 4 janvier 1937.

Le Doyen de la Faculté des Sciences,

Ch. MAURAIN.

VU ET PERMIS D'IMPRIMER :

Le Recteur de l'Académie de Paris,

S. CHARLÉTY.

1860